

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

SMJER: NASTAVNIČKI STUDIJ FIZIKE I KEMIJE

**Natalija Mihelčić**

Diplomski rad

**Utjecaj magnetskog polja na rast slojeva sa  
metalnim otočićima**

Voditelj diplomskog rada: Dr. sc. Vesna Janicki

Ocjena diplomskog rada: \_\_\_\_\_

Povjerenstvo: 1. \_\_\_\_\_

2. \_\_\_\_\_

3. \_\_\_\_\_

4. \_\_\_\_\_

Datum polaganja : \_\_\_\_\_

Zagreb, 2016.



## Sadržaj

Sadržaj .....	iii
1. Uvod .....	1
1.1. Općenito .....	1
1.2. Materijali .....	2
2. Teorijska podloga i eksperimentalne tehnike .....	4
2.1. Polarizirano svjetlo .....	4
2.2. Magnetska svojstva tvari .....	9
2.3. Adhezija i rast metalnih otočića .....	11
2.4. Optička svojstva slojeva s metalnim otočićima .....	14
2.5. Eksperimentalne tehnike .....	16
2.5.2. Elipsometrija .....	16
2.5.4. SEM .....	18
3. Eksperiment .....	20
3.1. Naparavanje pomoću elektronskog snopa .....	20
3.2. Mjerenja .....	24
3.3. Pogreška .....	25
4. Rezultati .....	26
4.1. Izotropni uzorci .....	26
4.2. Uzorci rađeni sa magnetom .....	27
4.3. SEM mjerenja .....	33
5. Diskusija .....	36
6. Zaključak .....	39
7. Metodički dio .....	40
7.1. Opažanja i eksperiment u nastavi fizike .....	40
7.2. Oerstedov pokus .....	42
Literatura .....	44



# 1. Uvod

## 1.1. Općenito

Tema ovog diplomskog rada je utjecaj magnetskog polja na rast slojeva s metalnim otočićima. Slojevi metalnih otočića se sastoje od metalnih klastera nanesenih na površinu dielektrične podloge i oni predstavljaju jedan od najosnovnijih nanomaterijala. Rast metalnih slojeva započinje adsorpcijom atoma metala na podlogu koji se procesom nukleacije stapaju u male klastere. Povećanjem količine nanesenog metala klasteri rastu sve dok se ne sjedine tvoreći veće otočiće. Daljnjom depozicijom materijala popunjavaju se šupljine između otočića pri čemu nastaje kontinuirana makroskopska mreža. Prijelaz iz izoliranih metalnih otočića u kontinuiranu makroskopsku mrežu opisujemo pragom perkolacije [1, 2, 3].

Optička svojstva slojeva metalnih otočića (*eng. metal island films (MIF)*) se bitno razlikuju od optičkih svojstva metala. Pri točki perkolacije kada se metalni klasteri sjedinjuju tvoreći kontinuirani metalni sloj mijenjaju se i električna svojstva sloja od dielektričnog do vodljivog. Metalni otočići mogu apsorbirati elektromagnetsko zračenje što rezultira pojavom površinskih plazmona. To su kolektivne oscilacije elektrona unutar otočića koje su u fazi sa upadnom zrakom svjetla. Frekvencija oscilacija ovisi o svojstvima metala, veličini i obliku otočića, te svojstvima dielektrične podloge na koju su naneseni. Mijenjanjem geometrijskih parametra otočića moguće je postići apsorpciju elektromagnetskog zračenja u području od vidljivog do infracrvenog dijela spektra. Na optička svojstva također utječe i temperatura podloge na koju naparavamo sloj metalnih otočića. Porastom temperature podloge apsorpcijski maksimum se pomiče prema manjim valnim duljinama i postaje uži. Takvi materijali kod kojih možemo kontrolirati apsorpciju svjetlosti mogu se koristiti za izradu filtera, apsorpcijskih premaza, bioloških i kemijskih senzora, polarizatora, pohranu podataka i sl. [1,4]

Anizotropni metamaterijali kao što su kvazi-jednodimenzionalni plazmonski kristali imaju veliku primjenu u telekomunikacijama, za izradu senzora, biomedicini itd. Takvi kristali imaju periodičnu strukturu koja je građena od naizmjeničnih slojeva metala i

dielektrika. Njihova struktura može sadržavati različite metalne nanočestice, nanoštapiće ili jako tanke ploče. Specifični su po tome što imaju anizotropna optička svojstva [5].

Pod atmosferskim uvjetima na površini srebra se formira tanki sloj sulfida koji ima slabu vodljivost. Posljedica izlaganja slojeva metalnih otočića atmosferskim uvjetima je promjena u morfološkoj strukturi samog sloja. Nanočestice koje su duže izložene atmosferi mijenjaju oblik na način da im rubovi postaju više zaobljeni, a površina im postaje tamnija. Ova činjenica ograničava mogućnost primjene nanočestica srebra za senzore [6].

Na Institutu Ruđer Bošković se rade slojevi metalnih otočića metodom naparavanja elektronskim snopom i proučavaju se njihova optička i morfološka svojstva. U ovom radu želimo vidjeti utječe li magnetsko polje na rast otočića. Metodom naparavanja nastaju otočići koji su slučajno raspoređeni po površini, neujednačenih veličina i nepravilnog oblika. Primijenimo li magnetsko polje na njih moguće je da će doći do izduljenja otočića što želimo utvrditi ovim radom. U slučaju da magnetsko polje utječe na rast, želimo vidjeti gube li se anizotropna svojstva tako nastalog sloja nakon uklanjanja magneta. Također, želimo istražiti možemo li očuvati takva svojstva prekrivanjem sloja metalnih otočića dodatnim dielektričnim slojem. Mjerenje optičkih svojstava koja bi mogla upućivat na anizotropnost uzorka radit ćemo uz pomoć elipsometra. Konkretnu morfološku sliku uzorka ćemo odrediti uz pomoć skenirajućeg elektronskog mikroskopa.

## 1.2. Materijali

Uzorke smo proizveli metodom naparavanja na podlogama od BK7 optičkog stakla i Si pločicama u visokom vakuumu. Optička stakla su ona koja su proizvedena tako da im je indeks loma homogen u cijelom volumenu, jako su čvrsta i relativno imuna na oštećenja, te mogu izdržati temperaturu od 400°C do 700°C. Ona transmitiraju elektromagnetska zračenja u ultraljubičastom i srednjem dijelu infracrvenog spektra. Borosilikatno staklo ili BK7 staklo je krunsko staklo indeksa loma od 1.51 do 1.54 ovisno o valnoj duljini upadnog zračenja. Karakterizira ga značajna apsorpcija elektromagnetskog zračenja valnih duljina manjih od 350 nm. Imaju mali koeficijent termalne ekspanzije ( $\sim 5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  na 20°C) što ih čini otpornima na termalni šok [7,8].

Silicijeve pločice smo također koristili kao podlogu. Silicij je poluvodič sa indeksom loma od 3.42. Jedan Si kristal se može procesuirati u ploče polumjera do 300 mm. Ovisno o kristalnoj orijentaciji silicija imamo Si(100) i Si(111) ploče [9].

Kako bi uklonili mogući utjecaj nečistoća podloge na kojima rastu metalni otočići, na podlogu smo prvo naparavali sloj silicijevog dioksida ( $\text{SiO}_2$ ) koji ima jaku adheziju sa staklom. Sloj  $\text{SiO}_2$ , nastao metodom naparavanja, raste u amorfnu strukturu koja sadrži šupljine koje se ispune vlagom iz zraka kada uzorak dođe u doticaj sa atmosferom. Ovisno o količini vode u šupljinama mijenja se indeks loma.  $\text{SiO}_2$  je pogodan za korištenje u UV i vidljivom dijelu spektra, odnosno u intervalu između 250 nm i 1100 nm. Pri valnoj duljini od 550 nm indeks loma iznosi 1.45-1.53. Silicijev dioksid smo također koristili kao pokrovni sloj kako bi spriječili da slojevi srebra oksidiraju na zraku [7,10].

Srebro je plemeniti metal kojeg smo naparavali na dielektričnu podlogu pri čemu su nastali metalni otočići. Njegova adhezija na dielektrične podloge je slaba. Srebro ima dijamagnetska svojstva koja možemo opaziti samo u prisustvu vanjskog magnetskog polja. Na zraku srebro ne oksidira, ali nakon nekog vremena potamni zbog reakcije s tragovima sumporovodika ( $\text{H}_2\text{S}$ ) koji su prisutni u zraku, pri čemu nastaje srebrov sulfid ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ) koji je crne boje.

Aluminijev oksid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) također korišten ovisno o uvjetima izrade kao pokrovni sloj, najčešće raste u kristaliničnim mikrostrukturama visoke gustoće. Indeks loma pri valnoj duljini od 550 nm iznosi 1.58-1.68. Zbog svoje strukture također sadrži šupljine koje mogu biti ispunjene vodom ako je uzorak ostavljen u prisutnosti vlage iz zraka pri čemu se mijenjaju optička svojstva sloja. Ima dobru adheziju na staklo i na metale kao što su aluminij i srebro. Propušta elektromagnetske valove od 300 nm do 5  $\mu\text{m}$ , te zbog sličnih svojstava može se koristiti u kombinaciji sa silicijevim dioksidom tvoreći višeslojnu strukturu [10].

## 2. Teorijska podloga i eksperimentalne tehnike

U ovom diplomskom radu smo mjerili optička svojstva uzoraka koji su se sastojali od sloja metalnih otočića srebra prekrivenog sa dielektričnim slojem. Polarizacija reflektirane svjetlosti sa takvog uzorka ovisi o veličini, obliku otočića, udaljenosti između otočića, te dielektričnom sloju kojeg smo koristili. U ovom poglavlju ćemo opisati polarizaciju svjetlosti kako bi razumjeli princip rada elipsometra kojeg smo koristili za mjerenje optičkih karakteristika uzoraka.

Tijekom naparavanja srebra na podlogu djelovala je i magnetska sila. Koristili smo permanentni magnet koji smo pričvrstili na podlogu. Srebro ima dijamagnetska svojstva što znači da se može očekivati da će magnetsko polje utjecati na rast samih otočića. Ukupna sila je u smjeru magnetskog polja što vodi do smanjenja kontaktnog kuta, te povećanja dodirne površine između uzorka i podloge. Kako bi razumjeli na koji način magnetsko polje utječe na rast otočića, u ovom poglavlju ćemo opisati magnetska svojstva materijala i adheziju.

### 2.1. Polarizirano svjetlo

Svjetlo je elektromagnetski val koji se sastoji od sinkronizirane oscilacije električnog i magnetskog polja koji se gibaju brzinom svjetlosti u vakuumu. Električno polje titra u ravnini okomitoj na ravninu u kojoj titra magnetsko polje, a obje te ravnine su okomite na smjer širenja vala čineći elektromagnetski val transverzalnim.

Uzmimo planarni harmonijski elektromagnetski val čija su polja  $\vec{E}$  i  $\vec{H}$  dana izrazima:

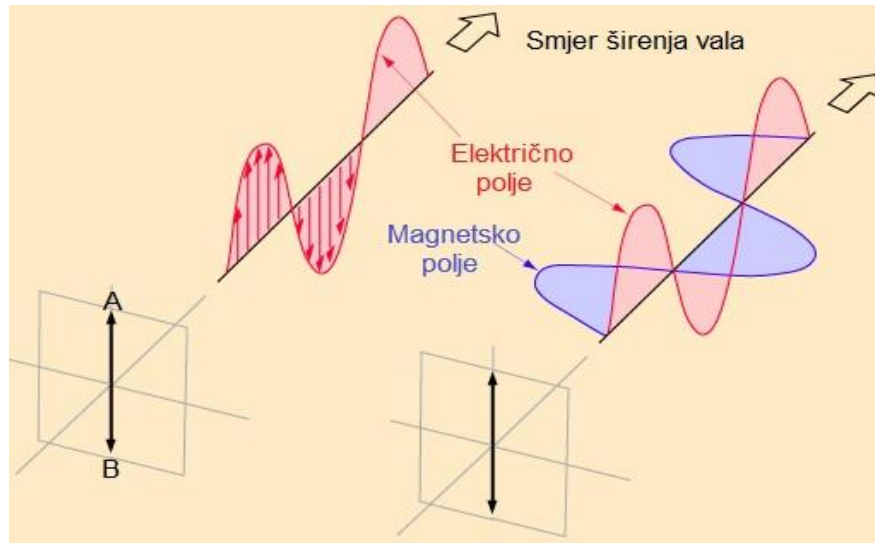
$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \quad (2.1)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \quad (2.2)$$

Polja  $\vec{E}$  i  $\vec{H}$  su međusobno okomita i u fazi, a dogovoreno smjer električnog polja određuje smjer polarizacije. Ako su amplitude  $\vec{E}_0$  i  $\vec{H}_0$  konstantni realni vektori tako polariziran val titra samo u jednoj ravnini, te kažemo da je val linearno polariziran ili ravno polariziran. Presiječemo li pravac širenja vala okomitom ravninom, titranje ravno polariziranog vala



projicira se u dužinu AB (Slika 2.1), čija orijentacija ne ovisi o mjestu presjeka ili trenutku promatranja. Zato se ravno polarizirani val zove i linearno polarizirani val. Dužina AB također je smjer polarizacije, kao što je vidljivo iz Slike 2.1 [11,12].

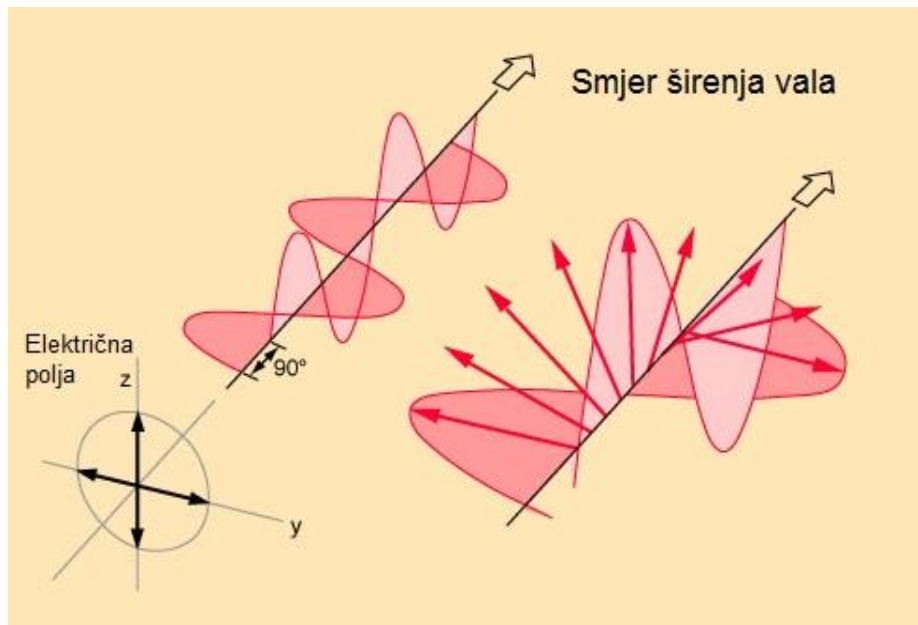


Slika 2.1: Shematski prikaz linearno polarizirane svjetlosti

Ako uzmemo dva linearno polarizirana vala koja imaju jednake amplitude  $E_0$  te su međusobno okomito polarizirana sa razlikom u fazi od  $\pm \frac{\pi}{2}$ , ukupno električno polje možemo zapisati kao:

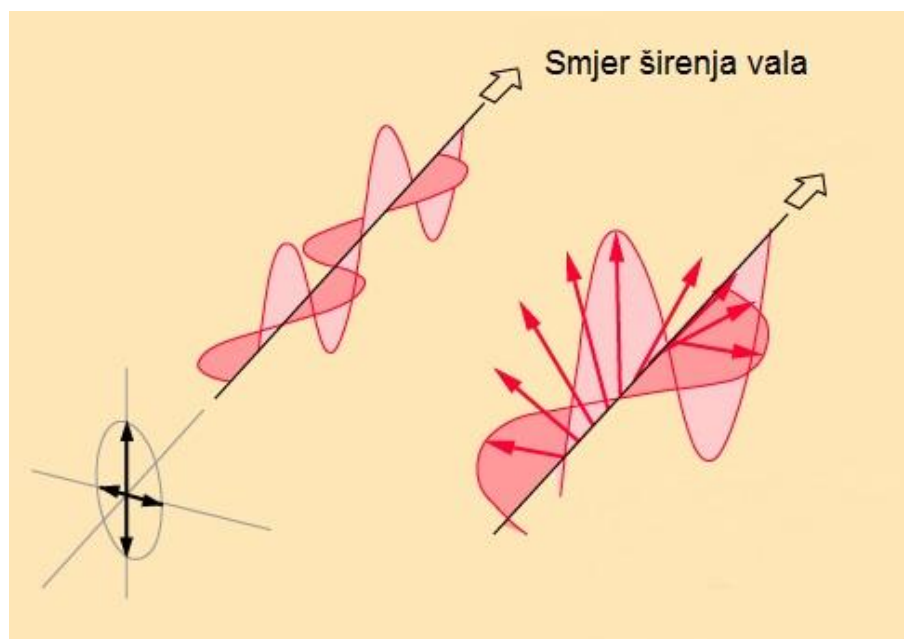
$$\vec{E} = E_0[\hat{x} e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} + \hat{y} e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t \pm \frac{\pi}{2})}] \quad (2.3)$$

Ovu jednadžbu možemo interpretirati kao jedinstven val u kojem električni vektor  $\vec{E}$  ima konstantnu veličinu, ali rotira kutnom frekvencijom  $\omega$  u bilo kojem danom položaju. Takav val se naziva kružno polarizirani val. Smjer rotacije električnog polja možemo odrediti pravilom desne ruke; ako palac desne ruke pokazuje smjer širenja vala onda će prsti pokazivati smjer rotacije električnog vektora. Svjetlo će biti desno polarizirano ako električni vektor rotira u smjeru suprotno od kazaljke na satu (Slika 2.2), a lijevo polarizirano ako rotira u smjeru kazaljke na satu [11].



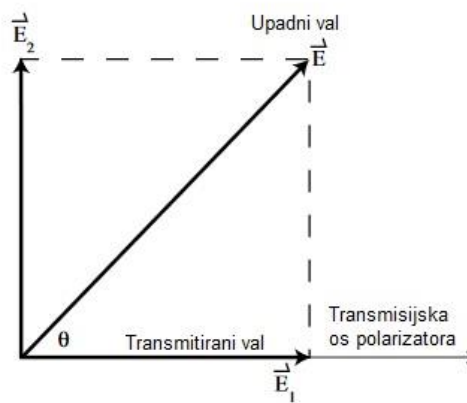
Slika 2.2: Shematski prikaz kružno polarizirane svjetlosti. Ako se val približava opažaču, električni vektor za njega se giba u smjeru suprotno od kazaljke na satu, što znači da je ovaj val desno polariziran.

Kada dva polarizirana vala nemaju jednake amplitude, rezultatno električno polje će u svakoj točki prostora imati drugačiju vrijednost pri čemu će rotirati u obliku elipse. Takav val nazivamo eliptično polariziranim valom (Slika 2.3) [13].



Slika 2.3: Shematski prikaz eliptično polarizirane svjetlosti

Sunčeva svjetlost je nepolarizirana svjetlost što znači da su polja u svakom trenutku orijentirana na nepredvidiv, slučajan način. Nepolariziranu svjetlost možemo prevesti u linearno polariziranu svjetlost uz pomoć linearnog polarizatora koji propušta električno polje koje titra samo duž određenog pravca. Transmisijska os polarizatora definira smjer propuštanja vektora električnog polja. Svjetlost čiji je električni vektor pod nekim kutom s obzirom na transmisijsku os je absorbiran ili oslabljen. Razmotrimo nepolariziranu svjetlost koja upada na idealan linearni polarizator. Trenutno električno polje  $\vec{E}$  možemo rastaviti na dvije međusobno okomite komponente  $\vec{E}_1$  i  $\vec{E}_2$ , gdje je  $\vec{E}_1$  u smjeru transmitirane osi polarizatora ( Slika 2.4).



Slika 2.4: Shematski prikaz polarizacije svjetlosti

Ako  $\vec{E}$  zatvara kut  $\theta$  sa transmisijskom osi onda će veličina transmitiranog polja biti:

$$E_1 = E \cos \theta \quad (2.4)$$

Transmitirani intenzitet svjetlosti  $I_1$  je proporcionalan sa kvadratom polja, te je opisan Malusovim zakonom:

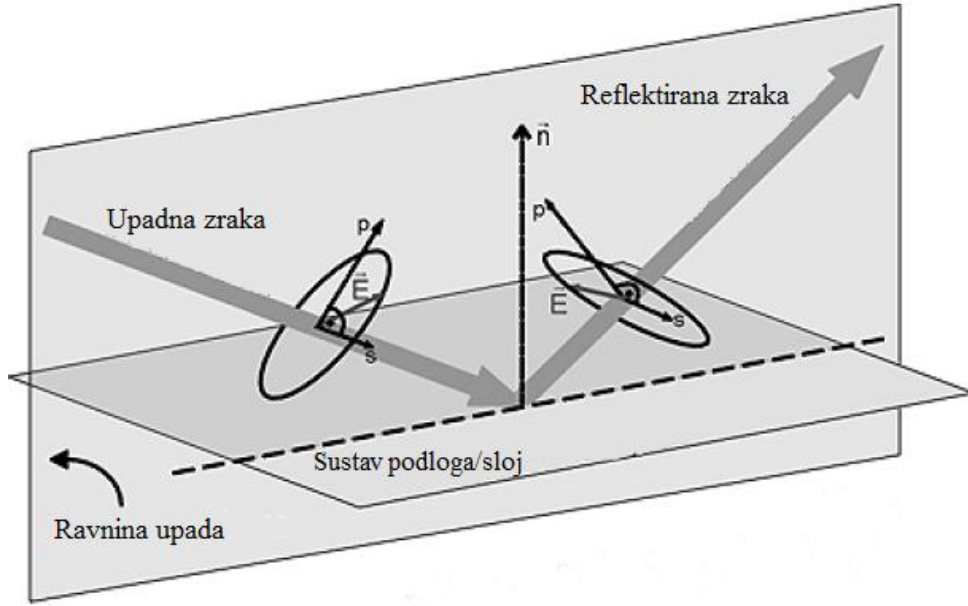
$$I_1 = I \cos^2 \theta \quad (2.5)$$

Ovdje je  $I$  intenzitet upadne zrake svjetlosti [10].

Osim prolaskom kroz polarizator, nepolariziranu svjetlost možemo polarizirati i refleksijom na površini dielektričnog materijala ili prolazom kroz kristal dvolomac [12].

Kada svjetlosna zraka osvjetli površinu uzorka dolazi do promjene u polarizaciji reflektiranog vala. Ravninu upadne zrake možemo definirati uz pomoć valnog vektora  $k$ ,

koji ima isti smjer kao i putujuća svjetlosna zraka, te uz pomoć vektora normale površine  $\hat{n}$  (Slika 2.5). Sada možemo definirati  $x$  i  $y$  smjer tako da  $x$  bude paralelan na plohu upada, a  $y$  okomit. Ovi smjerovi odgovaraju oznakama  $p$  (za paralelni smjer) i  $s$  (za okomiti smjer). Električno polje  $\vec{E}$  sada možemo rastaviti na  $p$  i  $s$  komponentu.



Slika 2.5: Shematski prikaz refleksije svjetlosne zrake od uzorka (sustav podloga/sloj).

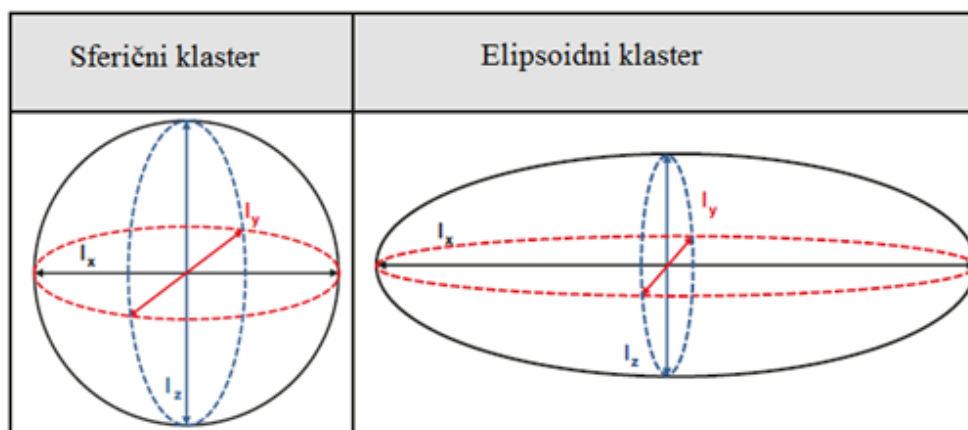
Uzorak od kojeg se svjetlost reflektira može biti kompleksni optički sustav koji sadrži slojeve različitih materijala sa različitim optičkim svojstvima. Višestruke refleksije koje se događaju između slojeva uzorka preklapaju se pri čemu formira reflektirani val sa promjenom u stanju polarizacije. Komponente  $p$  i  $s$  će iskusiti pomak u fazi. Posljedica toga je promjena u obliku i veličini eliptično polarizirane svjetlosti. Takva promjena je mjera za određivanje svojstava optičkog sustava. Ulazno i izlazno električno polje su povezani sa matricom refleksije ( $R$ ) uzorka:

$$\begin{bmatrix} E_{p,out} \\ E_{s,out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{pp} & R_{sp} \\ R_{ps} & R_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{p,in} \\ E_{s,in} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Promjenu u stanju polariziranog svjetlosnog vala kako bi dobili informaciju o uzorku (matrici  $R$ ) smo mjerili uz pomoć elipsometra [14].

Ako imamo metalni klaster sferičnog oblika (slika 2.6) njegova optička svojstva neće ovisiti o orijentaciji vektora električnog polja. Situacija će se promijeniti ako je klaster elipsoidnog oblika. Ovisno o orijentaciji električnog polja elektromagnetskog vala imat

ćemo drugačiji odziv elektrona unutar klastera. Uzmimo da je klaster izduljen u smjeru x-osi. Ako imamo upadno električno polje istog smjera, elektroni koji su ubrzani će morati preći veću udaljenost nego u slučaju da je polje bilo usmjereno u y ili z smjeru. Posljedica toga je da će optička svojstva sloja s izduljenim klasterima biti različita ovisno o smjeru polarizacije elektromagnetskog vala. Stoga, sloj s izduljenim metalnim klasterima ima anizotropna optička svojstva [15].



Slika 2.6: Shematski prikaz sferičnog i elipsoidnog klastera.  $l_x$ ,  $l_y$  i  $l_z$  su udaljenosti oscilacija elektrona.

## 2.2. Magnetska svojstva tvari

Magnetski fenomeni su posljedica gibanja električnog naboja. Kada bi materijal mogli promotriti na atomskoj razini primijetili bi male strujne petlje što su zapravo elektroni koji kruže oko jezgre atoma i oko svoje osi. Makroskopski gledano te strujne petlje su magnetski dipoli koji se u materijalima ponište zbog nasumične orijentacije atoma. Stavimo li materijal u magnetsko polje magnetski dipoli će se poravnati i medij postati magnetski polariziran ili magnetiziran. Magnetizaciju definiramo kao magnetski dipolni moment po jedinici volumena. Ako je magnetizacija u materijalu paralelna sa vanjskim magnetskim poljem, što znači da su se magnetski dipoli poravnali u smjeru vanjskog polja, onda ćemo imati paramagnete, a ako je suprotna imat ćemo dijamagnete. Njihova svojstva održava vanjsko magnetsko polje, čim ga maknemo magnetizacija nestaje te se magnetski dipoli ponovno nasumično orijentiraju. Paramagneti i dijamagneti su linearni mediji što znači da zadovoljavaju jednadžbu  $\vec{M} = \chi \vec{H}$ , gdje je  $\vec{M}$  magnetizacija,  $\vec{H}$  pomoćno magnetsko polje, a

$\chi$  magnetska susceptibilnost koja ovisi o materijalu, te je pozitivna za paramagnetike i negativna za dijamagnetike [16].

Materijali koji zadržavaju magnetizaciju kada uklonimo vanjsko magnetsko polje nazivaju se feromagnetni. Oni su nelinearni mediji u kojima se svaki dipol želi orijentirati u istom smjeru kao njegov susjed tvoreći domene koje sadrže puno dipola. Unutar materijala koji imaju feromagnetska svojstva domene su nasumično orijentirane pri čemu se magnetska polja ponište te nemamo magnetizaciju. Stavimo li materijal u jako magnetsko polje pojaviti će se zakretni moment koji želi usmjeriti dipole paralelno sa poljem, no s obzirom da vole ostati u paralelnoj orijentaciji sa susjednim dipolima mnogi od njih se odupiru zakretnom momentu. Na granici između dviju domena pojavljuju se konkurentni susjedni dipoli koje će zakretni moment zakrenuti na stranu one domene koja je najviše paralelna sa vanjskim magnetskim poljem. Uloga magnetskog polja je da ukloni granice domene i ako je polje dovoljno jako sve domene će se usmjeriti u smjeru jedne domene, te onda kažemo da je materijal zasićen. Ovaj proces nije u potpunosti reverzibilan što znači da ako isključimo vanjsko magnetsko polje neke domene će se vratiti u početnu orijentaciju, a ostatak će imati orijentaciju koja je bila prije isključenja polja. Materijali koji zadržavaju magnetska svojstva nakon što uklonimo vanjsko magnetsko polje nazivaju se *permanentni magneti* [16].

Dijamagnetska svojstva se javljaju kod materijala sa parnim brojem elektrona. Posljedica su kruženja elektrona oko jezgre atoma. Coulombova sila je odgovorna za kružno kretanje elektrona oko jezgre, te ima ulogu centripetalne sile. Stavimo li materijal u prisustvo vanjskog magnetskog polja, koje je okomito na ravninu kruženja, pojaviti će se Lorenzova sila. Ovisno o smjeru kruženja elektrona, magnetska sila će povećati ili smanjiti centripetalnu silu koja djeluje na elektron:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{R^2} \pm e\bar{v}B = m_e \frac{\bar{v}^2}{R} \quad (2.7)$$

gdje je  $e$  naboj elektrona,  $R$  polumjer kruženja,  $B$  vanjsko magnetsko polje,  $\bar{v}$  brzina elektrona,  $m_e$  masa elektrona i  $\epsilon_0$  permitivnost vakuuma. Posljedica toga je ubrzavanje ili usporavanje elektrona. Promjena orbitalne brzine znači i promjenu dipolnog momenta ( $m$ ). Magnetski moment koji je usmjeren suprotno od vanjskog magnetskog polja će se povećati, a onaj koji je usmjeren u smjeru vanjskog polja će se smanjiti.

$$\Delta \vec{m} = -\frac{1}{2}e(\Delta v)R\hat{z} = -\frac{e^2 R^2}{4m_e} \vec{B} \quad (2.8)$$

ovdje je  $\Delta \vec{v}$  promjena brzine nakon što materijal stavimo u magnetsko polje. Možemo iz gornjeg izraza primijetiti da je promjena magnetskog dipolnog momenta u suprotnom smjeru od smjera magnetskog polja. U dijamagneticima su magnetski momenti usmjereni suprotno od vanjskog polja. Posljedica toga je odbijanje dijamagnetskog materijala od permanentnog magneta. Takvi materijali će se unutar magnetskog polja orijentirati u onom smjeru gdje je polje najmanje. Dijamagnetizam je prisutan u svim materijalima, no s obzirom da je to svojstvo jako slabo možemo ga primijetiti samo u onim materijalima koji nemaju druge oblike magnetizma [16, 17].

## 2.3. Adhezija i rast metalnih otočića

Adhezija je pojava međusobnog privlačenja materijala (adheziva) sa površinom nekog tijela (podloga) zbog zajedničkog djelovanja raznih fizičkih, mehaničkih i kemijskih sila koje su u međusobnoj interakciji. S obzirom da je nemoguće razdvojiti ove sile razlikujemo više teorija koje opisuju fenomen adhezije adheziva na podlogu:

- Mehanička teorija
- Adsorpcijska teorija
- Kemisorpcijska teorija
- Difuzijska teorija
- Elektrostatska teorija

U ovom diplomskom radu opisat ću samo adsorpcijsku teoriju koja je bitna za razumijevanje rasta slojeva sa metalnim otočićima.

Nastanak sloja metala ovisi o koheziji i adheziji. Koheziju određuje jakost međumolekulskih sila između adheziva, a adheziju jakost međudjelovanja između adheziva i podloge. U adsorpcijskoj teoriji adhezija je rezultat molekularnog kontakta između dva materijala pri čemu nastaju privlačne površinske sile, a to su obično sekundarne ili Van der Waalsove sile. Kako bi adhezija bila optimalna adheziv mora vlažiti površinu podloge, što znači da adheziv teče i pokriva površinu kako bi maksimizirao kontaktno područje sa

podlogom, a time i privlačne sile između njih. Vlaženje ovisi o energiji površine podloge i površinskoj napetosti adheziva. U ovom radu metalne nanočestice su adheziv koje rastu na podlozi, a taj proces rasta je daleko od termodinamičke ravnoteže. Konačna morfologija filma je određena kinetikom rasta. Unatoč tome, zaključci iz termodinamike se mogu primijeniti pošto je rast kinetički ograničen količinom. Pod uvjetima termodinamičke ravnoteže, način rasta je određen pomoću površinske energije metala ( $\gamma_{met}$ ), podloge ( $\gamma_{sup}$ ), i međufaze metal-podloga ( $\gamma_{int}$ ). Ako je sljedeći uvjet zadovoljen:

$$\gamma_{int} + \gamma_{met} \leq \gamma_{sup} \quad (2.9)$$

formacija međuprostora metal-podloga je termodinamički povoljna i metal vlaži površinu, što odgovara dvodimenzionalnom modu rasta (sloj po sloj). U ovom slučaju je interakcija između podloge i metalnih čestica veća nego između susjednih čestica [18, 19].

U slučaju kada je formacija međuprostora metal-podloga termodinamički nepovoljna, očekuje se trodimenzionalna formacija agregata. Ovdje je interakcija između susjednih atoma adheziva veća od njihove interakcije sa podlogom pri čemu dolazi do stvaranja otočića. Energija adhezije je definirana kao:

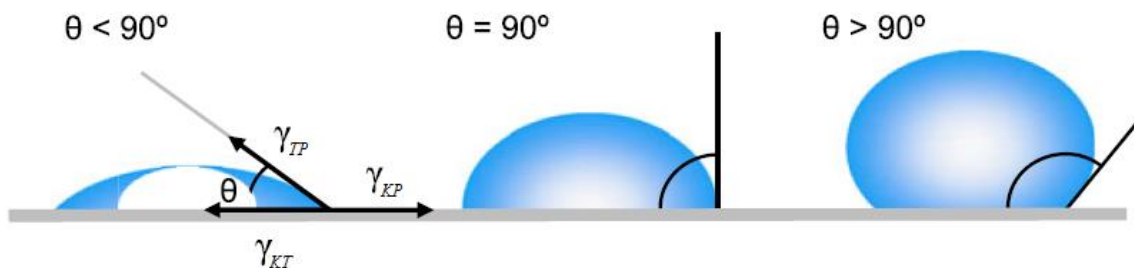
$$E_{adh} = \gamma_{met} + \gamma_{sup} - \gamma_{int} \quad (2.10)$$

Adhezivi imaju površinsku napetost koja je posljedica kohezivnih sila. Ako je energija površine podloge veća od površinske napetosti tekućeg materijala imat ćemo dobro vlaženje što možemo odrediti uz pomoć kontaktnog kuta koji je opisan Youngovom jednačinom:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{KP} - \gamma_{KT}}{\gamma_{TP}} \quad (2.11)$$

gdje je  $\gamma_{KP}$  međupovršinska napetost između krute podloge i zraka,  $\gamma_{KT}$  međupovršinska napetost između krute i tekuće faze,  $\gamma_{TP}$  međupovršinska napetost između tekuće i plinovite faze, a  $\theta$  kut između tekuće i krute faze (*kontaktni kut*).





Slika 2.7: Shematski prikaz međupovršinske napetosti između krute, tekuće i plinovite faze što nam određuje kontaktni kut.

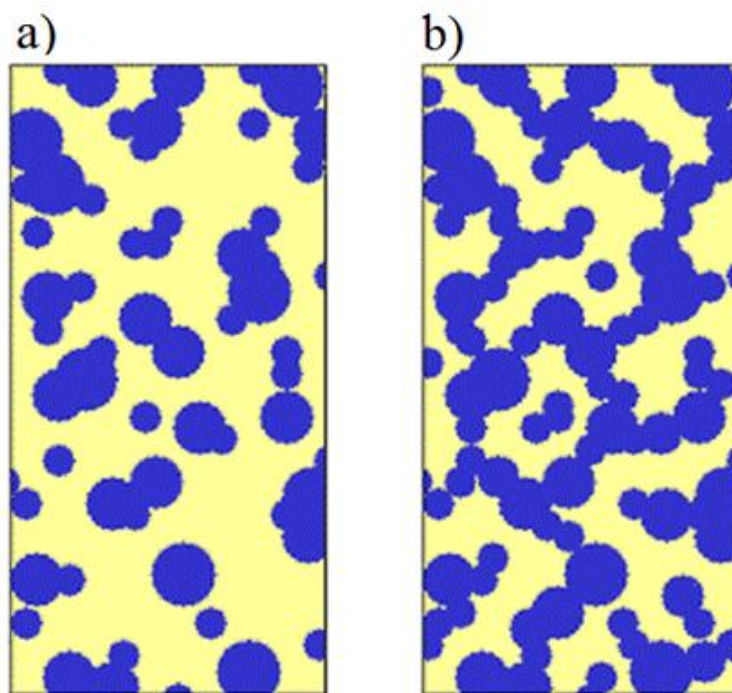
Pri postupku naparavanja srebro je deponirano na podlogu. Možemo ga zamisliti kao zamrznutu kapljicu koja se nalazi na krutoj površini. Međufaza između krutog, tekućeg i plinovitog agregatnog stanja naziva se *trofazna kontaktna linija*. Hoće li deponirano srebro rast u obliku otočića ili u slojevima možemo opisati i uz pomoć kontaktnog kuta. Ako je kontaktni kut manji od  $90^\circ$ , vlaženje podloge će biti povoljno što znači da će se fluid raširiti kroz veću površinu podloge. Vlaženje podloge neće biti pogodno kada je kontaktni kut veći od  $90^\circ$ . U tom slučaju fluid minimalizira svoj kontakt sa površinom, te nastaju kompaktne sferične kapljice (slika 2.7). Potpuno vlaženje se događa pri kontaktnom kutu od  $0^\circ$  i u tom slučaju imamo rast adheziva u sloju. Za sve kutove veće od  $0^\circ$  imat ćemo rast uzorka u obliku otočića [18, 19].

Oblik otočića je određen površinskom napetošću. Međumolekulska sila između tekućeg uzorka i površine podloge se naziva površinska napetost. Svaki atom koji se nalazi unutar otočića djeluje na susjedni atom istom silom, pri čemu je ukupna sila nula. Atomi koji se nalaze u dodiru sa površinom podloge imaju susjedne atome samo iznad sebe koji na njih djeluju silom koja ih gura prema unutrašnjosti otočića. Posljedica toga je da tekući uzorak ima kontakt sa površinom na način da slobodna površinska energija bude najniža [18].

Jačina interakcije između metala i podloge je dana odnosom energije adhezije i površinske energije metala,  $E_{adh}/\gamma_{metal}$ . Što je omjer manji, interakcija je manja, a samim time i adhezija na površinu. Omjer  $E_{adh}/\gamma_{metal}$  za srebro deponirano na dielektrični sloj  $\text{SiO}_2$  je od 0.188 do 0.214 [10].

Kod slojeva metala koji rastu u obliku otočića, u kasnijoj fazi rasta dolazi do stapanja više manjih otočića u veće. Stapanje se može dogoditi zbog doticanja susjednih otočića prilikom njihovog rasta. Također, ako imamo dva manja otočića oni će formirati jedan veći jer time smanjuju površinsku energiju sustava. S dodatnim materijalom prostor između

otočića se popunjava, te nastaje kontinuirani metalni sloj. Prijelaz između izoliranih otočića u kontinuiranu makroskopsku mrežu naziva se prag perkolacije (Slika 2.8). Time je omogućeno slobodno kretanje elektrona što bitno utječe na optička svojstva sloja [1].



Slika 2.8: Shematski prikaz praga perkolacije, a) izgled sloja prije praga perkolacije b) izgled sloja nakon praga perkolacije

## 2.4. Optička svojstva slojeva s metalnim otočićima

Slojevi s metalnim otočićima (*eng. metal island films (MIF)*) predstavljaju jednu od najosnovnijih nanostruktura. Imaju gotovo planarnu raspodjelu koja se sastoji od nakupina metalnih čestica veličine nekoliko nanometara deponiranih na dielektričnu podlogu. Te nakupine nazivaju se klasteri i pokazuju specifična optička svojstva [1].

U slojevima s metalnim otočićima elektroni se nalaze unutar klastera. U interakciji sa elektromagnetskim zračenjem doći će do kolektivne oscilacije površinskih elektrona. Takva pojava se naziva *lokalizirani površinski plazmon*. Elektroni osjećaju povratnu silu koja ih sprječava da napuste otočiće, te dolazi do rezonantnog gibanja. Zbog pojave lokaliziranih površinskih plazmonske rezonancije (*eng. surface plasmon resonance (SPR)*),

metalni otočići imaju jedinstvena optička svojstva koja se razlikuju od svojstava istoimenih metala u komadu [15].

Kao posljedica pojave lokaliziranih SPR dolazi do apsorpcije određenih valnih duljina, zbog čega transmitirano i reflektirano svjetlo vidimo obojano. Primjena slojeva s metalnim otočićima je korisna ako se apsorpcija svjetlosti može tolerirati ili je čak poželjna. Takve specifikacije su poželjne za selektivne apsorbere, neutralne filtere, filtere u boji ili za dekorativne premaze. Prednost slojeva metalnih otočića su njihova fleksibilna optička svojstva koja variraju ovisno o načinu pripreme i parametrima okoline u kojoj su napravljeni. Neki od tih parametara su temperatura podloge, količina deponiranog materijala i brzina depozicije [15].

Ako je veličina otočića i njihova međusobna udaljenost manja od valne duljine vidljive svjetlosti to ih čini optički homogenim sredstvom. Na taj način svjetlost ne raspoznaje pojedine elemente smjese. Makroskopska optička svojstva sustava koji se sastoji od više konstituenata možemo opisati pomoću efektivne optičke konstante. Jedan od modela uz pomoć kojeg opisujemo takav sustav naziva se Maxwell Garnettov model. Uzmimo da je jedan od konstituenata našeg sustava materijal domaćin ( $d$ ), a drugi koji je raspršen unutar njega gost ( $g$ ). Jednadžba koju zadovoljava ovaj sustav je:

$$\frac{(\varepsilon_{eff} - \varepsilon_d)}{\varepsilon_d + (\varepsilon_{eff} - \varepsilon_d)L} = p_g \frac{(\varepsilon_g - \varepsilon_d)}{\varepsilon_d + (\varepsilon_g - \varepsilon_d)L} \quad (2.12)$$

gdje je  $\varepsilon_{eff}$  efektivna dielektrična konstanta,  $\varepsilon_d$  dielektrična konstanta domaćina,  $\varepsilon_g$  dielektrična konstanta gosta,  $L$  depolarizacijski faktor i  $p_g$  faktor volumnog popunjenja materijala  $g$ . Ako materijal  $g$  koji je karakteriziran dielektričnom konstantom  $\varepsilon_g$  zauzima volumen  $V_g$ , tada faktor volumnog popunjenja materijala  $g$  definiramo kao  $p_g \equiv \frac{V_g}{V}$ , gdje je  $V$  ukupni volumen sustava. U našem slučaju materijal domaćin je dielektrični sloj  $\text{SiO}_2$ , a metalni otočići srebra predstavljaju gosta [15].

Metalni klasteri se međusobno razlikuju u veličini, obliku i relativnoj orijentaciji. Ako imamo slučaj u kojem trebamo uzeti u obzir distribuciju oblika metalnih otočića, općenita jednadžba za efektivnu dielektričnu konstantu će izgledati:

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_d \int_0^1 g(L) \cdot \frac{1 + \frac{p_g(1-L)(\varepsilon_g - \varepsilon_d)}{\varepsilon_d + (\varepsilon_g - \varepsilon_d)L}}{1 - \frac{p_g L(\varepsilon_g - \varepsilon_d)}{\varepsilon_d + (\varepsilon_g - \varepsilon_d)L}} \cdot dL \quad (2.13)$$

ovdje,  $g(L)$  predstavlja normaliziranu distribuciju depolarizirajućeg faktora od svakog individualnog klastera. To proizlazi iz distribucije klastera u odnosu na njihovu geometriju [15].

## 2.5. Eksperimentalne tehnike

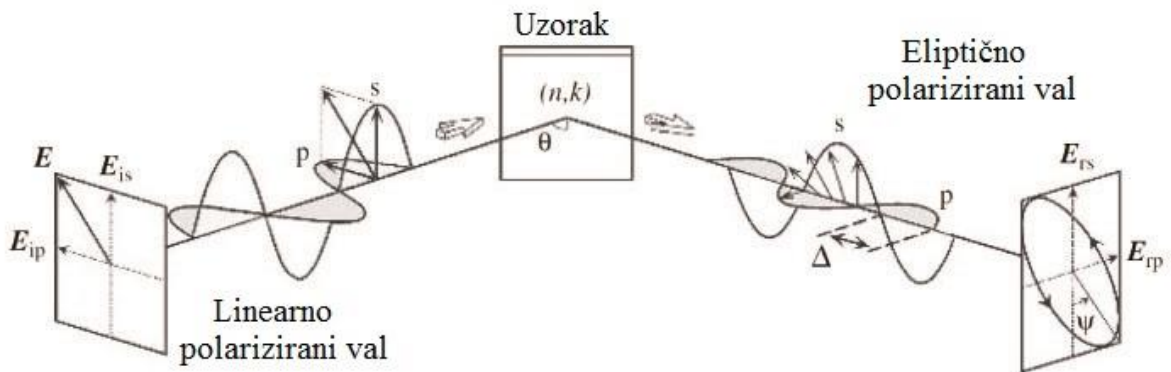
### 2.5.2. Elipsometrija

Spektroskopska elipsometrija je osjetljiva mjerna tehnika koja koristi polarizirano svjetlo kako bi ispitala tanke slojeve, površinu i mikrostrukturu materijala. Najčešće ju koristimo za određivanje dielektričnih funkcija raznih uzoraka ili višeslojnih materijala.

Elipsometar mjeri promjenu polarizacijskog stanja svjetlosti koja se reflektirala od uzorka. Veličine koje dobijemo mjerenjem su psi ( $\Psi$ ) i delta ( $\Delta$ ). Polarizacijsko stanje svjetlosti koje upada na uzorak može biti rastavljeno na  $s$  i  $p$  komponentu. Komponenta  $s$  oscilira paralelno sa površinom uzorka, a komponenta  $p$  oscilira paralelno sa ravninom upada svjetlosti (Slika 2.9). Intenziteti  $s$  i  $p$  komponente nakon refleksije su određeni koeficijentom refleksije  $R_s$  i  $R_p$ . Elipsometrijskim mjerenjem dobivamo iznos omjera koeficijenta refleksije  $s$  i  $p$ :

$$\rho = \frac{R_p}{R_s} = \tan(\Psi)e^{i\Delta} \quad (2.14)$$

gdje je  $\tan \Psi$  vezan uz promjenu amplitude, a  $\Delta$  promjenu u fazi vala. Elipsometar mjeri omjer dviju vrijednosti, stoga su mjerenja izuzetno točna [8, 20].

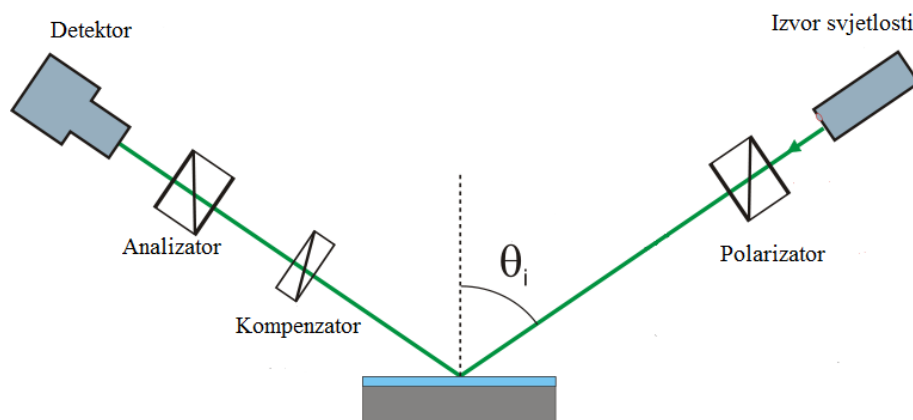


Slika 2.9: Shematski prikaz elipsometrijskog mjerenja.

Elipsometar može istovremeno mjeriti apsolutnu vrijednost i fazu komponenta polarizacije svjetlosti. Fazna mjerenja koristimo kako bi odredili debljinu tankih slojeva koja se temelje na interferometričkom efektu. Svjetlosna zraka koja se reflektira od prvog međusloja prisutnog u uzorku interferira sa svjetlosnom zrakom koja se reflektira od drugog međusloja u uzorku. Isti princip vrijedi kad je prisutno više slojeva u uzorku. Maksimalna debljina sloja koja se može odrediti iz elipsometrijskih mjerenja mora biti manja od koherentne valne duljine izvora svjetlosti.

Najčešći izvori svjetlosti koji se koriste u elipsometriji su termalne (halogene) žarulje ili izbojne plazma lampe pod velikim pritiskom, koje proizvode nepolarizirano svjetlo spektralne valne duljine od 250 nm (UV) do 2500 nm (NIR). Prema tome, elipsometar može okarakterizirati transparentne ili slabo apsorbirajuće tanke slojeve čija je debljina u intervalu koji je manji od nanometra, pa sve do nekoliko mikrometara [20].

Standardna mjerenja elipsometrom se događaju u vanjskoj konfiguraciji, što znači da se svjetlosna zraka širi u zraku (ili vakuumu) nakon čega se reflektira od (ili transmitira kroz) površine uzoraka, te ponovno širi zrakom prije nego što dođe do detektora. Elipsometar se sastoji od izvora svjetlosti, polarizatora, kompenzatora, analizatora i detektora (Slika 2.10). Nepolarizirana svjetlost postaje linearno polarizirana nakon što prođe kroz polarizator. Kompenzator radi pomak u fazi pri čemu nastaje eliptično polarizirana svjetlost koja zatim upada na uzorak. Rezultantni reflektirani val zatim prolazi kroz analizator prije nego što uđe u detektor. Polarizator, kompenzator i analizator mogu rotirati kako bi napravili mjerenja, no u većini konfiguracija kompenzator je fiksiran. U ovom eksperimentu smo koristili elipsometar *Woollam V-VASE* s rotirajućim analizatorom. Jednostavna mehanička rotacija se koristi kako bi harmonički modulirali intenzitet svjetlosti za detekciju [20].



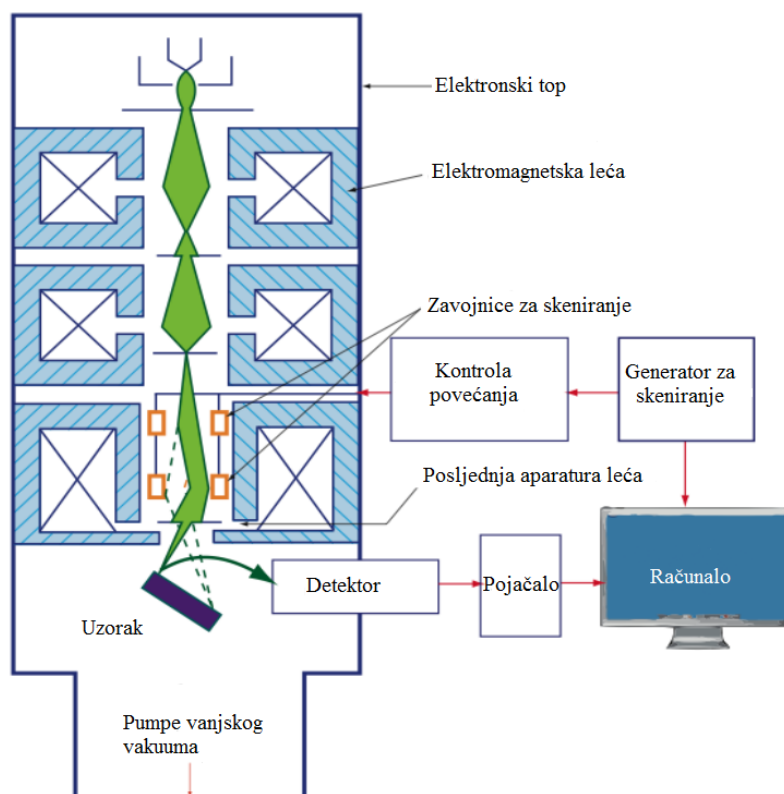
Slika 2.10: Shematski prikaz elipsometra

Elipsometrijska mjerenja omogućuju određivanje hrapavosti površina i debljine slojeva, a dobiveni kompleksni indeks loma se može povezati sa svojstvima kao što su: morfologija, kristaliničnost ili električna vodljivost.

#### 2.5.4. SEM

Pretražni elektronski mikroskop ili SEM (*eng. Scanning electron microscopy*) je uređaj koji pretražuje površinu uzorka uz pomoć vrlo precizno fokusiranog snopa elektrona. Snop elektrona pobuđuje, odnosno izbija elektrone koji se nalaze u sastavu atoma uzorka. Energija elektrona iz snopa je u izravnoj vezi sa interaktivno pobuđenim elektronima iz uzorka. Energije elektrona izbačenih iz uzorka se mjere preciznim detektorima, te se uz pomoć mikroprocesora stvara topografska slika uzorka [21].

Glavni dijelovi pretraživajućeg elektronskog mikroskopa su: elektronska kolona, sustav za pretraživanje, detektori, vakumski sustav i elektronički sustav koji pretvara signale u vidljivu sliku (Slika 2.11).



Slika 2.11: Shematski prikaz dijelova skenirajućeg elektronskog mikroskopa

Elektronska kolona se sastoji od elektronskog topa i od nekoliko elektromagnetskih leća. Kolona se nalazi unutar vakuuma, a glavna uloga joj je stvaranje elektronskog snopa. Vakuumski sustav je izrazito važan jer osigurava slobodan put snopu elektrona do uzorka. Međudjelovanje snopa elektrona i molekula plina u zraku mogu ograničiti broj elektrona koji dolaze do uzorka. Osim toga, kolona i uzorak sami po sebi sadrže određenu razinu onečišćenja. Elektronski top radi na principu termičke emisije. Sastoji se od katode, anode i Wehneltonovog cilindra. Kroz katodu prolazi struja pri čemu se ona zagrijava. Pri dovoljno visokoj temperaturi elektroni dobivaju dovoljno energije kako bi se emitirali. Uloga anode je da privlači elektrone i daje im akceleraciju, dok Wehneltov cilindar služi za formiranje snopa elektrona i povećanje jakosti struje. Elektronski snop zatim dolazi do sustava elektromagnetskih leća. One uz pomoć električnog i magnetskog polja utječu na putanju snopa elektrona. Njihova uloga je sužavanje snopa pri čemu je konačni dijametar snopa (probe) na uzorku svega 2-10 nm. Mali dijametar probe jedan je od osnovnih uvjeta za dobivanje slike u SEM-u [21,22].

Slika kod pretražnog elektronskog mikroskopa nastaje postepeno tokom vremena. Elektronski snop skenira liniju po liniju preko kvadratnog predloška na površini uzorka. U svakom trenutku snop elektrona osvjetljava samo jednu točku. Kako se elektronski snop pomiče dobit ćemo različite signale u svakoj točki zbog njegovog međudjelovanja sa uzorkom. Signal koji se stvara odlazi u detektor, a rezultatni signal je pojačan i prikazan na ekranu u obliku dvodimenzionalne slike [21,22].

Pretražni elektronski mikroskop ima nekoliko prednosti u odnosu na ostale mikroskope. Velika rezolucija nam omogućuje da se vide jako mali objekti. Dubina polja, što je zapravo sposobnost da objekti različite "visine" koji se nalaze na površini uzorka ostanu u fokusu. Jedna od prednosti je i mikroanaliza tj. sposobnost da se analizira kemijski sastav uzorka [21].

### 3. Eksperiment

U ovom radu proučavamo metalne otočiće srebra čija rezonantna pobuda dolazi u vidljivom dijelu elektromagnetskog spektra. Naši uzorci se sastoje od otočića srebra koja su deponirana na dielektrični sloj  $\text{SiO}_2$ . Za vrijeme depozicije srebra koristili smo magnet koji je mogao utjecati na orijentaciju i oblik klastera. Kako bi zadržali takav oblik klastera, a time i njihova optička svojstva prekrili smo ih sa slojem dielektrika.

Eksperiment je proveden na Institutu Ruđer Bošković u Laboratoriju za optiku i optičke tanke slojeve Zavoda za fiziku materijala. U ovom poglavlju će biti opisan proces pripreme uzoraka, te tehnika naparavanja koju smo pritom koristili. Ukratko ćemo opisati mjerenja koja smo radili na elipsometru i pretražnom elektronskom mikroskopu. Također, prikazat ćemo pogreške elipsometrijskih mjerenja nastalih zbog pozicioniranja uzorka.

#### 3.1. Naparavanje pomoću elektronskog snopa

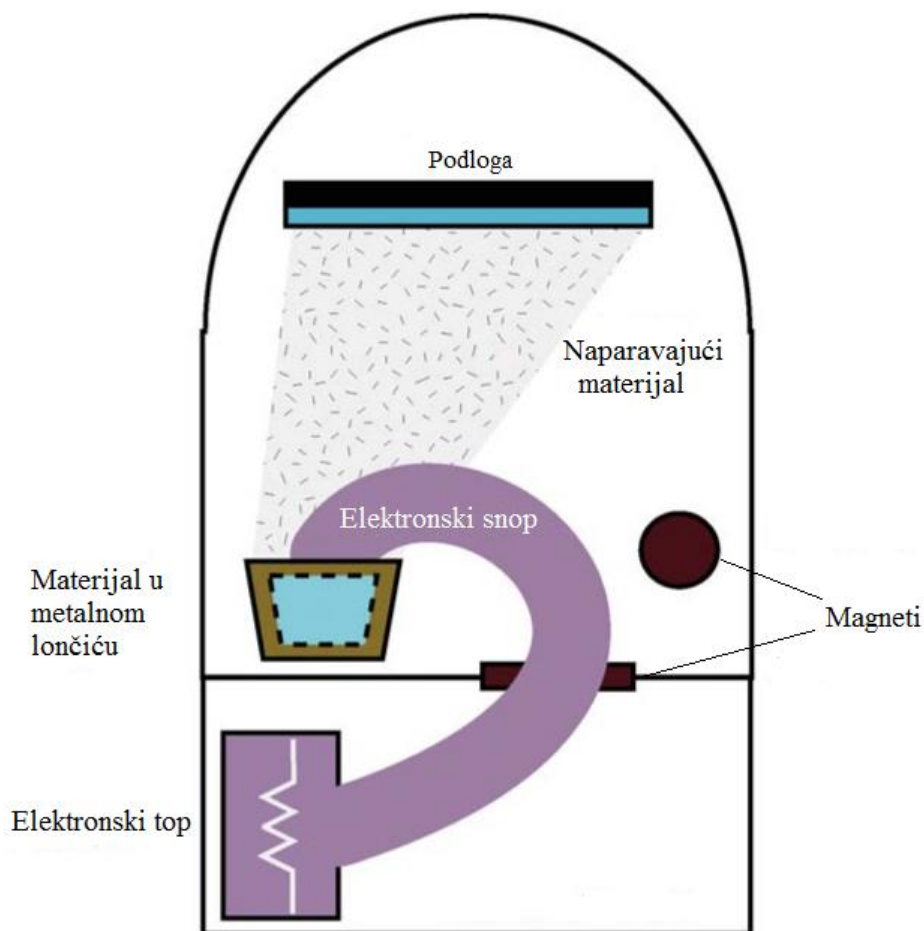
Slojeve sa metalnim otočićima srebra smo pripremili metodom naparavanja pomoću elektronskog snopa. To je proces u kojem snop elektrona koji se emitira iz elektronskog topa zagrijava materijal, koji isparava, te se kondenzira na hladnim površinama unutar komore za naparavanje, među ostalim i na podlogama za uzorke.

Proces naparavanja se događa u evaporacijskoj komori (Slika 3.1). U komori je vakuum što omogućava molekulama slobodno gibanje. U evaporacijsku komoru su smješteni elektronski top, metalni lončić u kojem se nalazi materijal koji se naparava, podloge na koje se materijal naparava, te kvarcni monitor za mjerenje masene debljine naparenog sloja. Proces naparavanja započinje zagrijavanjem volframove niti koja se nalazi u elektronskom topu. Kada se nit dovoljno zagrije dolazi do emisije elektrona koji se magnetima usmjeravaju i ubrzavaju prema lončiću. Pri sudaru snopa elektrona sa materijalom u lončiću dolazi do pretvorbe njihove kinetičke energije u termalnu energiju. Materijal zagrijavanjem isparava, nakon čega se giba prema podlozi na koju se kondenzira. Podloge su smještene na rotirajućem nosaču kako bi se postigla jednolika debljina naparenog sloja [23].

Debljina naparenog materijala je kontrolirana uz pomoć monitora sa kvarcnim kristalićem. Materijal se istovremeno naparava na podloge i na kristalić. Frekvencija titranja



kvarcnog kristalića mijenja se u ovisnosti o masi materijala koji se na njega deponira. Iz promjene frekvencije određuje se masa naparenog materijala po jedinici površine. Materijal se nanosi na podlogu u homogenom sloju, pa možemo odrediti debljinu sloja iz gustoće materijala i mase po jedinici površine. Željeni tlak u evaporacijskoj komori smo postigli uz pomoć vakuumskih pumpi, a predgrijavanje podloge na željenu temperaturu postiže se korištenjem grijača [7].



Slika 3.1: Shematski prikaz evaporacijske komore

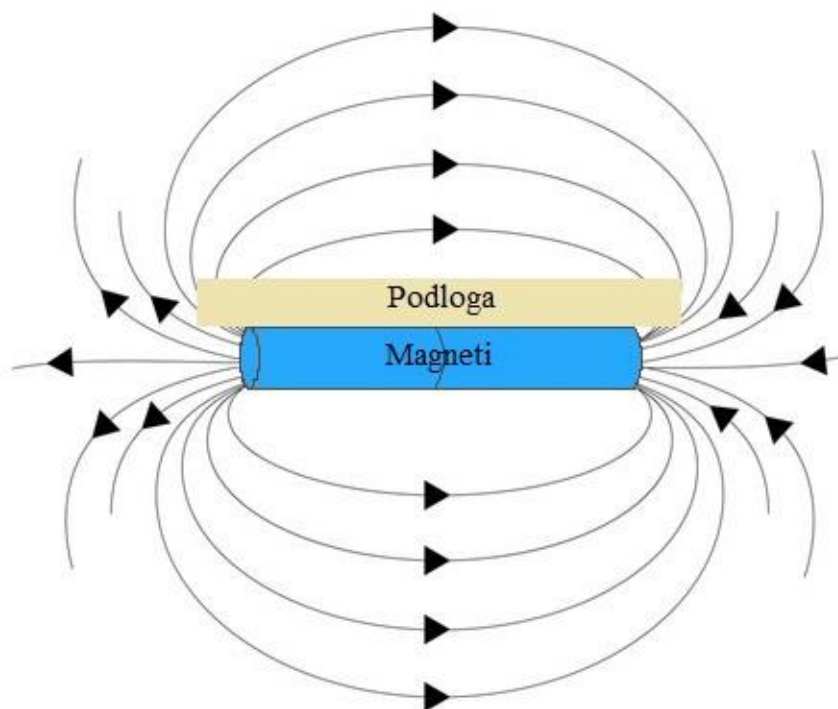
Slojevi su naparavani u evaporacijskoj komori *Varian 3117* pod tlakom od  $1.33 \times 10^{-5}$  mbar. Podloge koje smo koristili su Si pločice i BK7 staklo. Prije samog naparavanja podloge smo očistili etilnim alkoholom i ispuhali dušikom. Dimenzije BK7 stakla koje smo koristili su promjera 25 mm i debljine 1 mm, a obrađene su tako da paralelizam iznosi manje od 3' (lučne minute). Valovitost ploha pri valnoj duljini od 633 nm je  $\lambda/2$ . Navedene karakteristike čine ove podloge dovoljno kvalitetnima za izradu uzoraka na kojima ćemo raditi optička mjerenja.

Radili smo nekoliko vrsta uzorka, sa slojem srebra, koji se razlikuju po vrsti podloge koju smo koristili, pokrovnom sloju, te prisustvu magnetskog polja (Tablici 3.1).

Tablica 3.1. Prikaz uzoraka

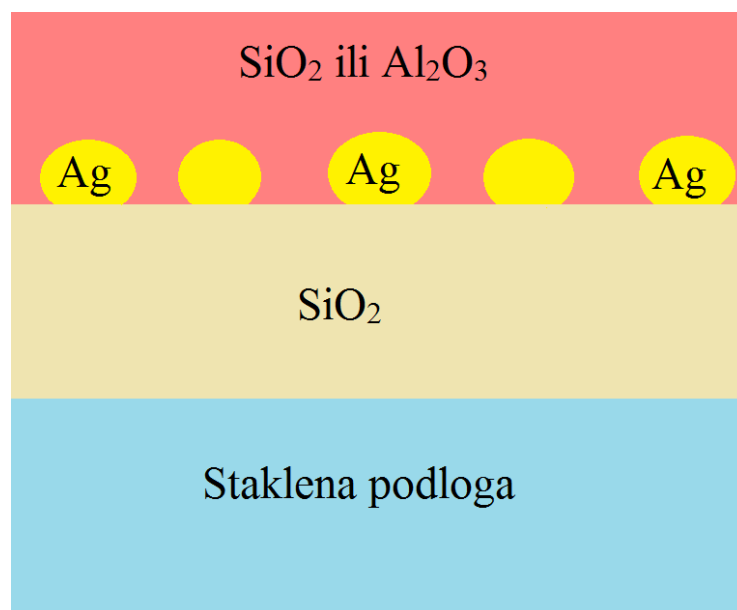
<b>Uzorak</b>	<b>Podloga</b>	<b>Pokrovni sloj</b>	<b>Prisustvo magneta</b>	<b>Debljina sloja srebra [Å]</b>
nc250	BK7 staklo	Nema	Da	70
nc252a	BK7 staklo	Nema	Ne	70
nc253a	BK7 staklo	SiO <sub>2</sub>	Ne	70
nc254a	BK7 staklo	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ne	70
nc252b	BK7 staklo	Nema	Da	70
nc253b	BK7 staklo	SiO <sub>2</sub>	Da	70
nc254b	BK7 staklo	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Da	70
nc252d	Si pločica	Nema	Da	70
nc253d	Si pločica	SiO <sub>2</sub>	Da	70
nc254d	Si pločica	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Da	70
nc261d	Si pločica	Nema	Da	70

Prije samog naparavanja na podloge smo pričvrstili dva permanentna magneta uz pomoć ljepljive trake koja može podnijeti visoke temperature (Slika 3.2). Koristili smo neodimijske magnete promjera 10 mm i debljine 5 mm, dok im deklarirana sila privlačenja iznosi 25 N. Njihova uloga je stvaranje magnetskog polja koje može utjecati na rast slojeva sa metalnim otočićima, da dođe do izduljivanja otočića, odnosno do pojave anizotropnosti u sloju.



Slika 3.2: Shematski prikaz položaja magneta u odnosu na podlogu.

Podloge smo zatim predgrijali na temperaturu od  $225\text{ }^{\circ}\text{C}$  kako bi se povećala mobilnost metalnih atoma po površini podloge, te povećali izgledi za formiranje uređene (anizotropne) strukture. Na staklenu podlogu prvo smo neparivali sloj  $\text{SiO}_2$  debljine  $980\text{ }\text{\AA}$ . Taj sloj smanjuje utjecaj nečistoća i nesavršenosti podloge na rast otočića. Na sloj  $\text{SiO}_2$  neparavan je sloj srebra debljine  $70\text{ }\text{\AA}$ , te u dva slučaja na njega pokrovni sloj od  $\text{SiO}_2$  ili  $\text{Al}_2\text{O}_3$  debljine  $300\text{ }\text{\AA}$  (Slika 3.2). Uloga pokrovnog sloja je da spriječi oksidaciju srebra na zraku, te zadrži moguću anizotropnost u sloju metalnih otočića. Tijekom procesa neparavanja uzorka porast masene debljine sloja u jedinici vremena, odnosno brzina neparavanja za  $\text{SiO}_2$  je iznosila  $10\text{ }\text{\AA}/\text{s}$ , za srebro  $1\text{ }\text{\AA}/\text{s}$  i za  $\text{Al}_2\text{O}_3$   $3\text{ }\text{\AA}/\text{s}$ . Podsloj  $\text{SiO}_2$  i sloj srebra za sve uzorke nc252, nc253 i nc254 je bio naparen u istom procesu, što osigurava da dani slojevi imaju iste debljine u svim navedenim uzorcima.



Slika 3.2: Ilustracija uzorka s tankim slojem srebra. Na staklenoj podlozi se nalazi sloj SiO<sub>2</sub> na kojem se nalaze otičići srebra. Na otičićima se nalazi pokrovni sloj SiO<sub>2</sub> ili Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

### 3.2. Mjerenja

Elipsometrijska mjerenja rađena na elipsometru *Woollam V-Vase* izvršena su u rasponu energije od 1.5 eV do 4.25 eV, sa korakom od 0.025 eV. Taj raspon energije odgovara rasponu valne duljine od 826.56 nm do 291.73 nm. Obzirom da korišteni elipsometar ima rotirajući analizator, mjerenja smo radili pod dva različita kuta, 45° i 65° za uzorke na BK7 staklu, te 65° i 75° za uzorke na Si pločicama. Veličine koje smo mjerili su kutevi  $\Psi$  i  $\Delta$ . Mjerenje u tom rasponu energije i kutova traje oko 30 min. Uzorak nc250 smo mjerili u dva navrata: prvi put nakon naparavanja, a drugi put nakon tri mjeseca gdje je uzorak bio izložen atmosferskim uvjetima. Zbog moguće pojave anizotropnosti, mjerenja smo vršili za dvije orijentacije uzoraka, okomitoj (o) i paralelnoj (p). Nakon svakog mjerenja, uzorak smo skinuli sa vakuumske stakle i ručno okrenuli za 90°.

Morfološku strukturu uzoraka smo mjerili uz pomoć pretraživajućeg elektronskog mikroskopa *Joel JSM-7000F*. Rezolucija mikroskopa je 1.2 nm u optimalnim uvjetima, a potreban vakum je reda veličine  $10^{-4}$  Pa. Obzirom da podloga mora biti vodljiva kako bi se izvršila SEM mjerenja, uzorci koje smo mjerili su bili deponirani na Si pločicama. Mjerenja su izvršena na dva uzorka. Prvi uzorak je bio napravljen isti dan kada i SEM (uzorak nc261d<sub>1</sub>), a drugi je bio izložen atmosferskim uvjetima tri mjeseca (uzorak nc252d).

### 3.3 Pogreška

Osim grešaka mjerenja koje dolaze od instrumenta, a na koje nemamo utjecaja, mogući izvor grešaka može nastati i zbog pozicioniranja uzorka. Do te greške dolazi zbog nemogućnosti da se uzorak pozicionira tako da se za svaku njegovu orijentaciju mjerenje vrši u točno istoj točki. Kako bi utvrdili imamo li pojavu anizotropnosti, a ne grešku koja je došla zbog pozicioniranja uzorka morali smo provesti analizu pogrešaka. Analizu smo radili na uzorku nc250 koji nije imao pokrovni sloj. Izračunali smo standardnu pogrešku (se) i srednju vrijednost (mean) za funkciju  $\Psi$  za upadni kut  $45^\circ$  i  $65^\circ$ .

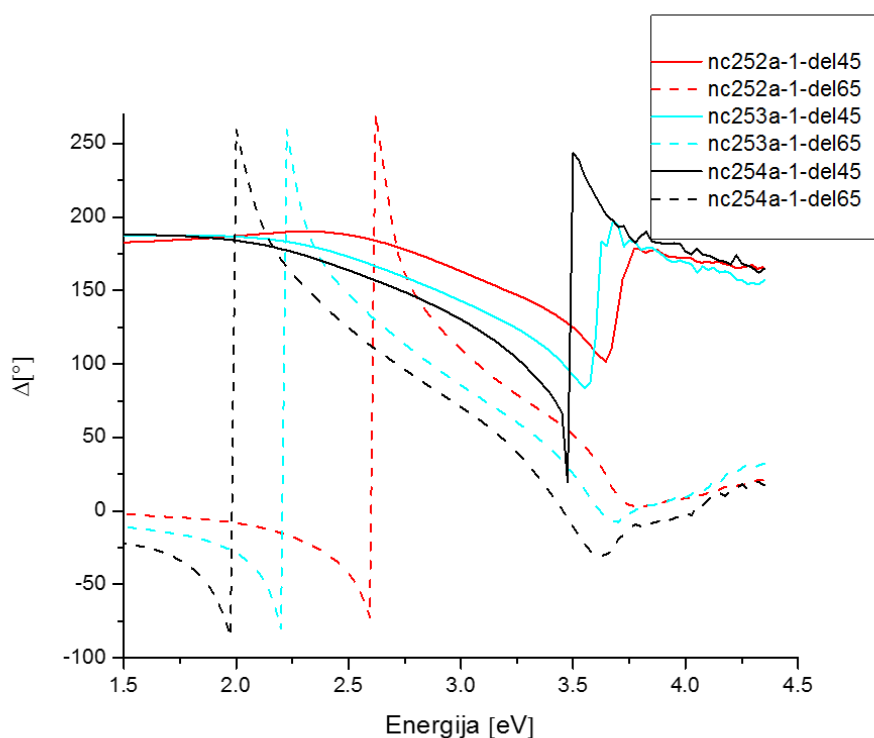
Pri procesu naparavanja nastaju metalni otočići koji nisu nužno jednoliki po cijeloj površini uzorka. Dodatni razlog može biti što magnetsko polje, zbog veličine magneta, nije bilo jednoliko po cijeloj površini uzorka.

## 4. Rezultati

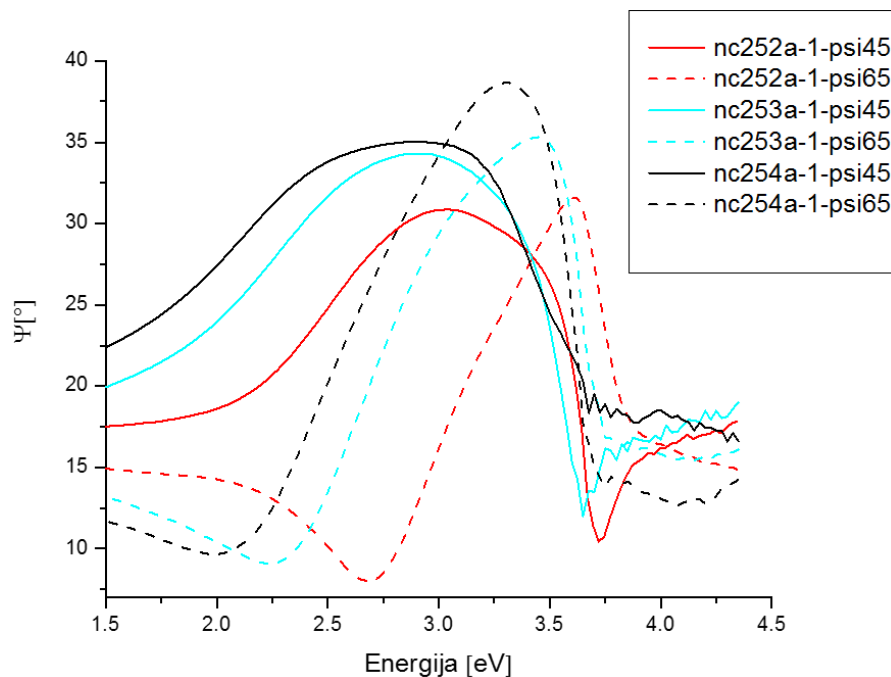
U ovom poglavlju ćemo prikazati rezultate koje smo dobili elipsometrijskim mjerenjima kako bi uočili postoji li anizotropnost u uzorcima. Elipsometrijska mjerenja smo obradili u programu Origin 7. Također, prikazat ćemo i morfološke slike uzoraka koje smo dobili uz pomoć pretraživajućeg elektronskog mikroskopa, te njihovu statističku analizu usmjerenosti otočića.

### 4.1. Izotropni uzorci

Slika 4.1 i 4.2 prikazuju elipsometrijske funkcije za uzorke koji nisu bili pod utjecajem magnetskog polja. Razlikuju se jedino po pokrovnom dielektričnom sloju.



Slika 4.1: Prikaz izmjerene elipsometrijske funkcije  $\Delta$  za izotropne uzorke koji se razlikuju po pokrovnom dielektričnom sloju. Mjerenja su napravljena pod upadnim kutovima 45° i 65°.

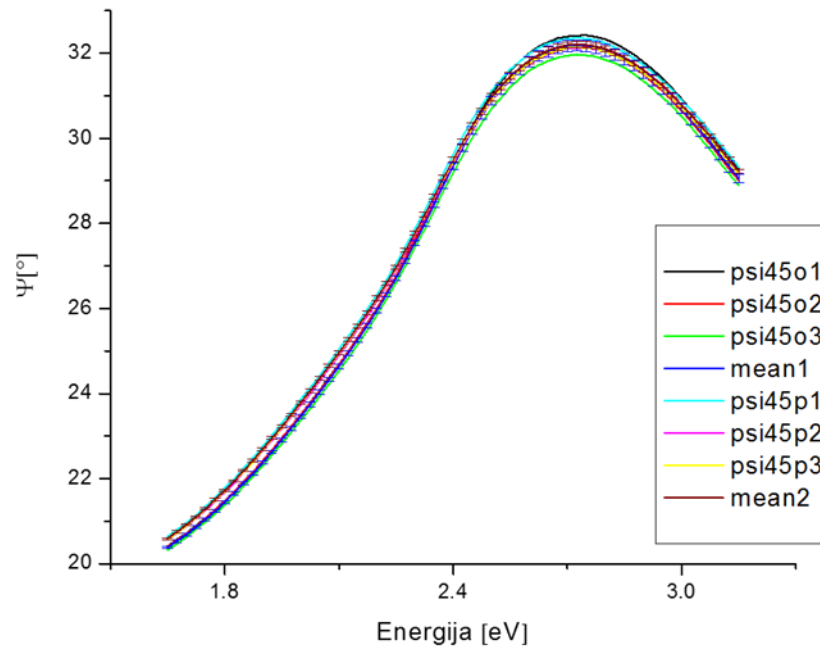


Slika 4.2: Prikaz izmjerene elipsometrijske funkcije  $\Psi$  za izotropne uzorke koji se razlikuju po pokrovnom dielektričnom sloju. Mjerjenja su napravljena pod upadnim kutovima  $45^\circ$  i  $65^\circ$ .

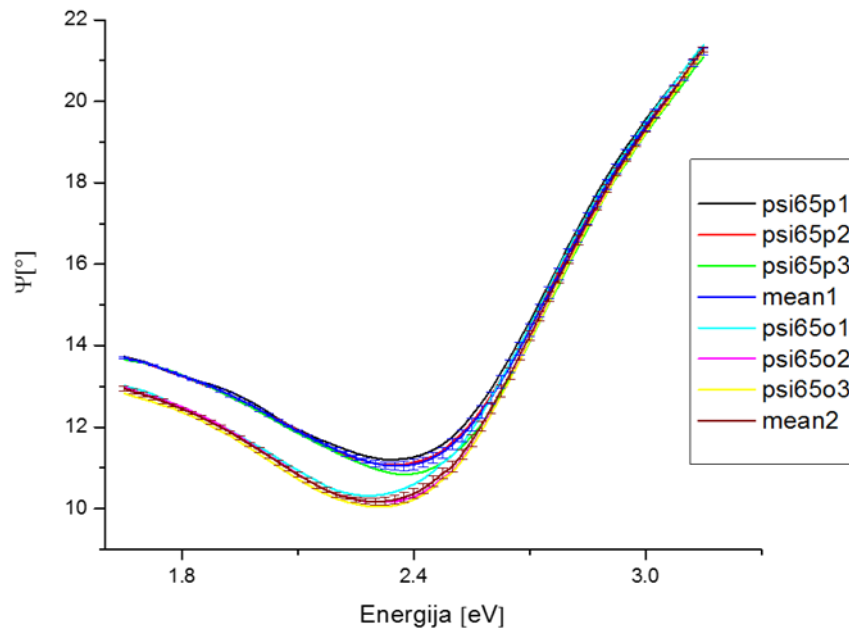
## 4.2. Uzorci rađeni sa magnetom

Uzorci koji su rađeni pod utjecajem magnetskog polja rađeni su na podlogama od BK7 stakla i Si pločicama. Ukupno smo radili osam uzoraka sa magnetom koji se razlikuju u pokrovnom sloju. Konkretno podatke za svaki uzorak možemo vidjeti u Tablici 3.1.

Na slici 4.3 možemo vidjeti da postoji manja razlika u mjerenim rezultatima (uzorak nc250) za o i p orijentaciju za upadni kut od  $45^\circ$ , nego što je to vidljivo na slici 4.4 za kut od  $65^\circ$ . Uvećani prikaz funkcije  $\Psi$  za kut od  $65^\circ$  možemo vidjeti na slici 4.5. Plavo i smeđe obojane linije nam pokazuju srednju vrijednost, a linije koje ih presijecaju su intervali standardne pogreške.

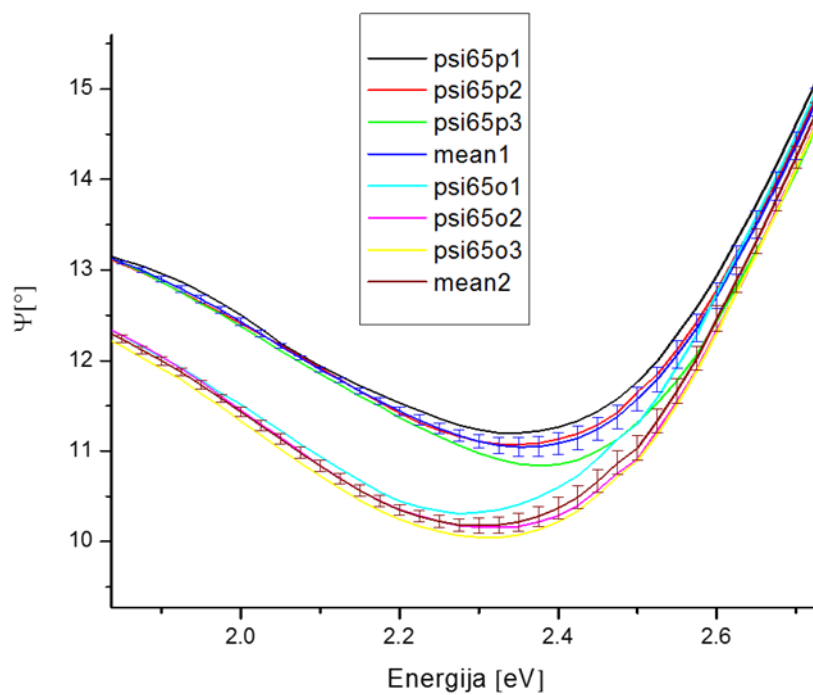


Slika 4.3: Izmjerene vrijednosti elipsometrijske funkcije  $\Psi$  mjerene pod upadnim kutom  $45^\circ$ , za dvije orijentacije uzorka, sa pripadajućim pogreškama za uzorak nc250 (mean1 predstavlja pogrešku za o orijentaciju, a mean2 predstavlja pogrešku za p orijentaciju).



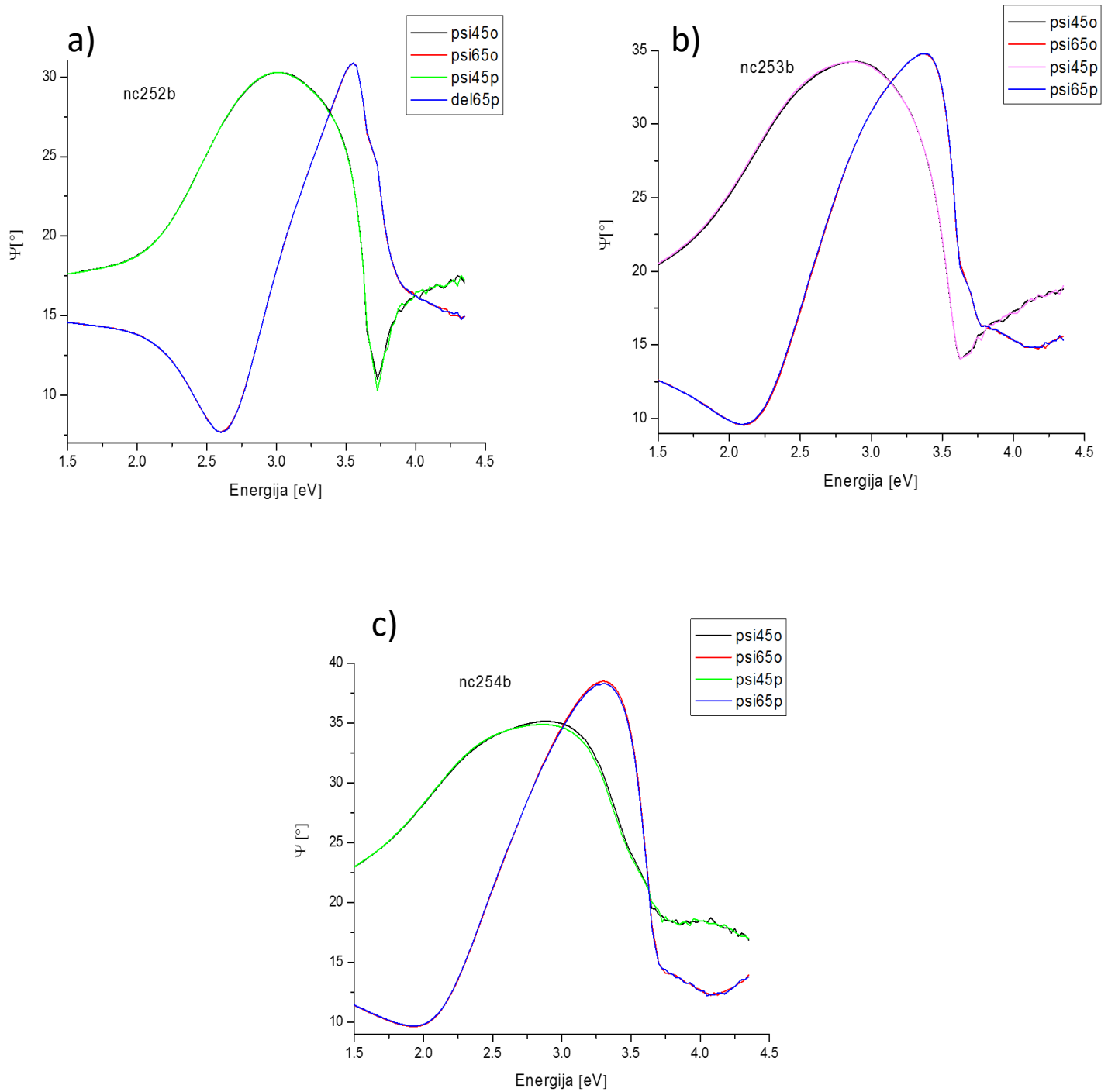
Slika 4.4 Izmjerene vrijednosti elipsometrijske funkcije  $\Psi$  mjerene pod upadnim kutom  $65^\circ$ , za dvije orijentacije uzorka, sa pripadajućim pogreškama za uzorak nc250 (mean1 predstavlja pogrešku za o orijentaciju, a mean2 predstavlja pogrešku za p orijentaciju).





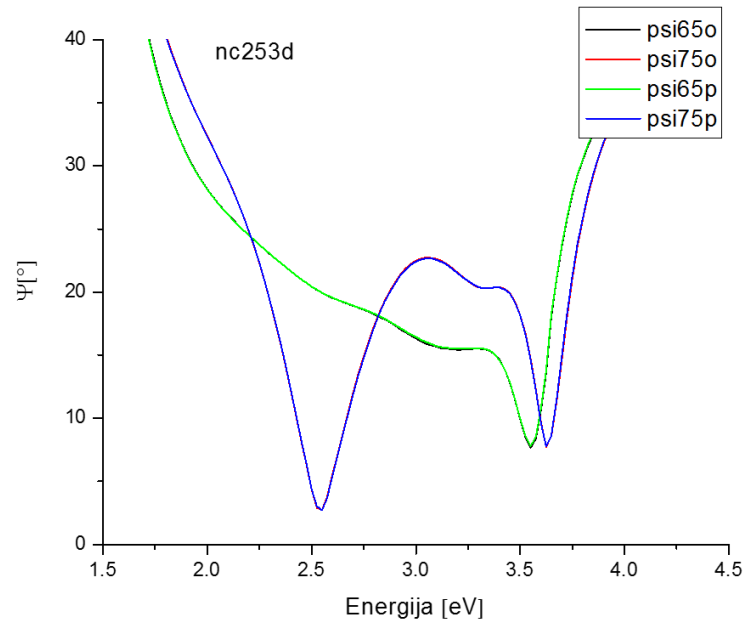
Slika 4.5: Izmjerene vrijednosti elipsometrijske funkcije  $\Psi$  mjerene pod  $65^\circ$ , te srednja vrijednost za svaku orijentaciju uzorka sa pripadajućim pogreškama (mean1 predstavlja pogrešku za o orijentaciju, a mean2 predstavlja pogrešku za p orijentaciju).

Na slici 4.6 vidimo prikaz elipsometrijske funkcije  $\Psi$  mjerene pod upadnim kutovima  $45^\circ$  i  $65^\circ$  za uzorke rađene na BK7 staklu.

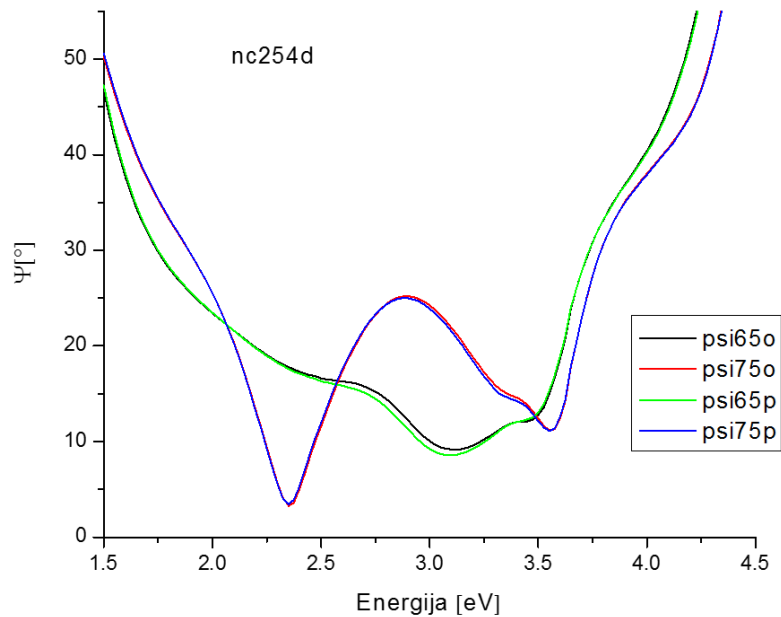


Slika 4.6: Prikaz izmjerene elipsometrijske funkcije  $\Psi$  mjerene pod upadnim kutovima  $45^\circ$  i  $65^\circ$ , za dvije orijentacije uzoraka. Uzorci su rađeni na podlozi od BK7 stakla pod utjecajem magnetskog polja. Uzorak pod: a) nema pokrovnog sloja, b) ima pokrovni dielektrični sloj  $\text{SiO}_2$ , c) ima pokrovni dielektrični sloj  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Elipsometrijska mjerenja za uzorke rađene na Si pločicama pod utjecajem magnetskog polja prikazane su na slici 4.7 i 4.8.

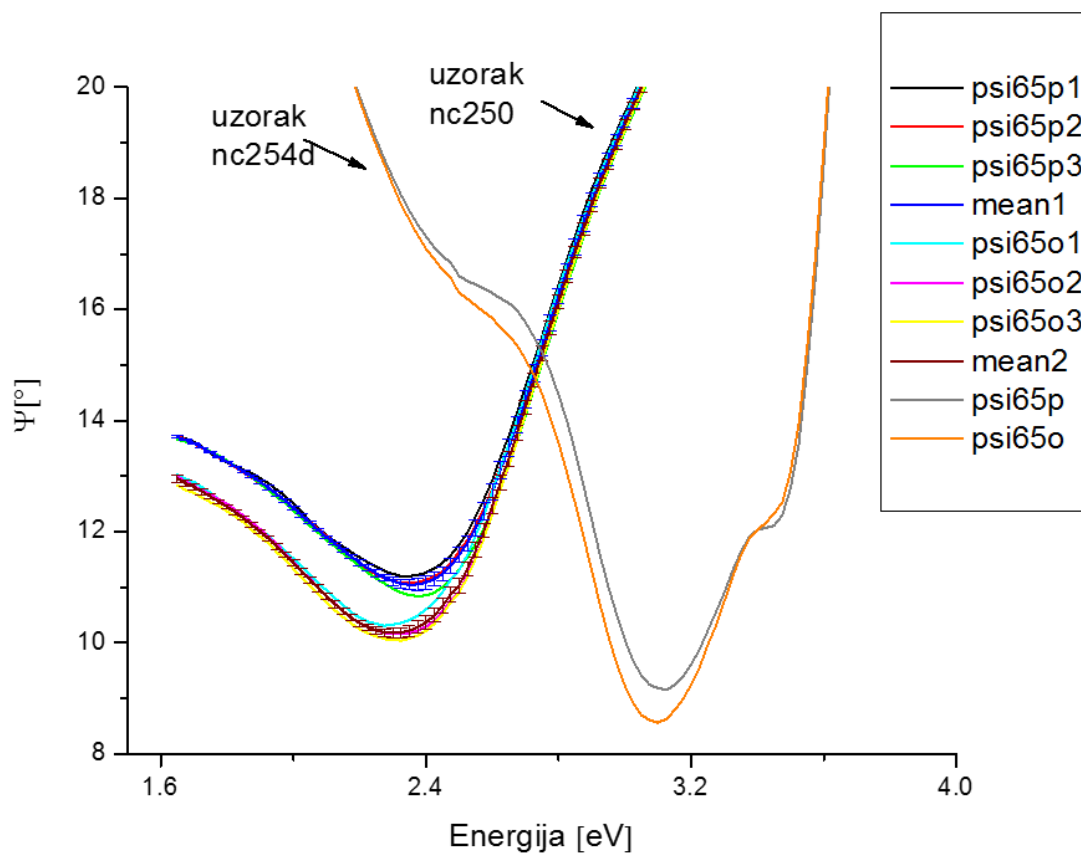


Slika 4.7: Prikaz izmjerene elipsometrijske funkcije  $\Psi$  mjerene pod upadnim kutovima  $65^\circ$  i  $75^\circ$ , za dvije orijentacije uzoraka. Uzorak je rađen na podlozi od Si pločice pod utjecajem magnetskog polja, te je prekriven dielektričnim slojem  $\text{SiO}_2$ .



Slika 4.8: Prikaz izmjerene elipsometrijske funkcije  $\Psi$  mjerene pod upadnim kutovima  $65^\circ$  i  $75^\circ$ , za dvije orijentacije. Uzorak je rađen na podlozi od Si pločice pod utjecajem magnetskog polja, te je prekriven dielektričnim slojem  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

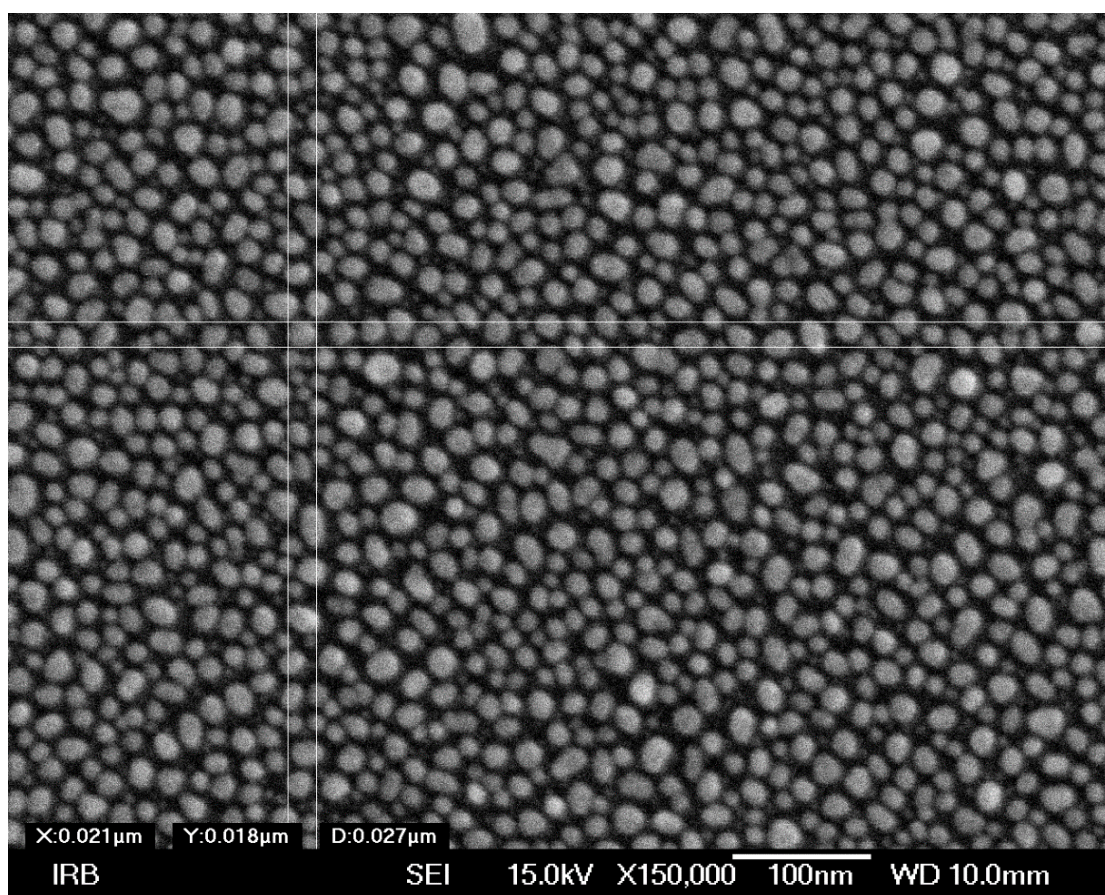
Slika 4.9 predstavlja usporedbu izmjerene elipsometrijske funkcije za uzorak nc250 i nc254d.



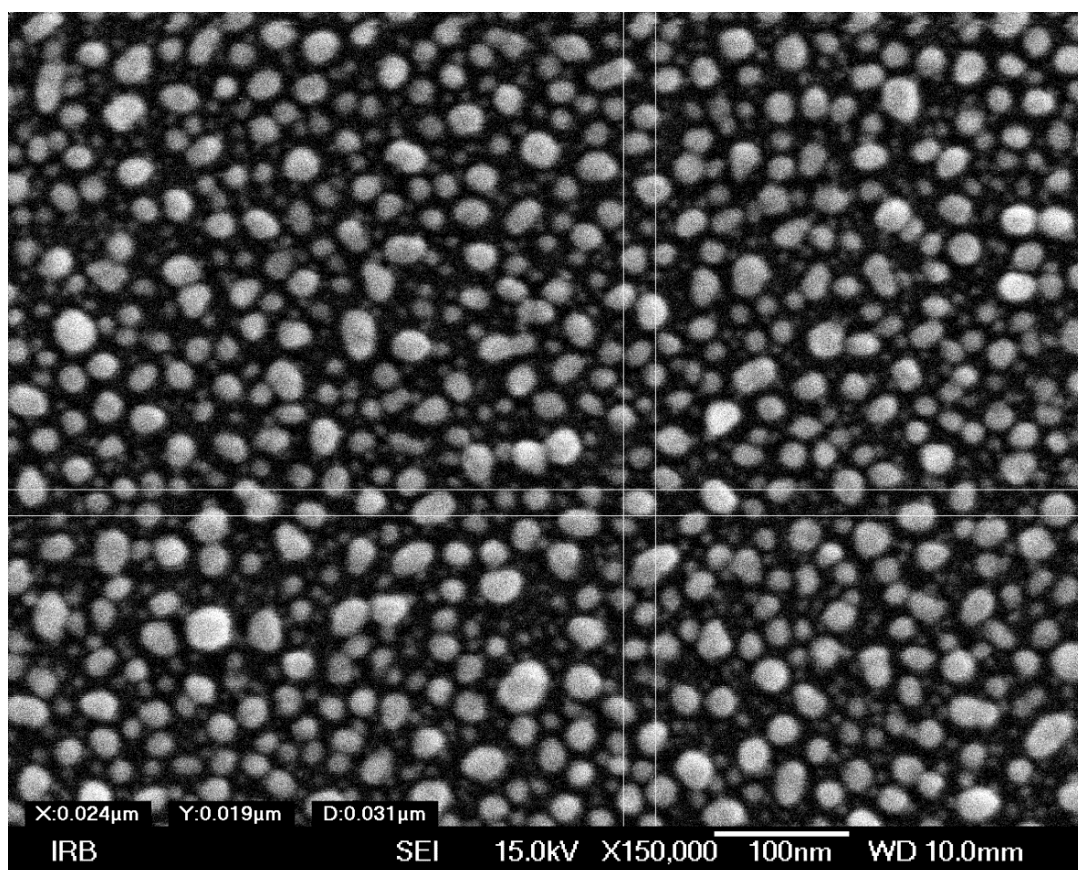
Slika 4.9: Prikaz izmjerene elipsometrijske funkcije  $\Psi$  mjerene pod upadnim kutom  $65^\circ$ , za dvije orijentacije uzoraka. Uzorak nc250 je rađen na podlozi od BK7 stakla, te nema pokrovni dielektrični sloj. Uzorak nc254d je rađen na Si pločici i ima pokrovni dielektrični sloj  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

### 4.3. SEM mjerenja

Kako bi vidjeli morfološku strukturu uzorka koristili smo se pretraživajućim elektronskim mikroskopom. Uzorci na kojima smo vršili mjerenja su rađeni na podlozi od Si pločica pod utjecajem magnetskog polja bez pokrovnog dielektričnog sloja. Prvi uzorak kojem smo analizirali morfološku strukturu bio je nc261d kojeg smo napravili isti dan kada smo radili i SEM mjerenje (Slika 4.10). Drugi uzorak je bio nc252d koji je nekoliko mjeseci bio izložen atmosferskim uvjetima (Slika 4.11).

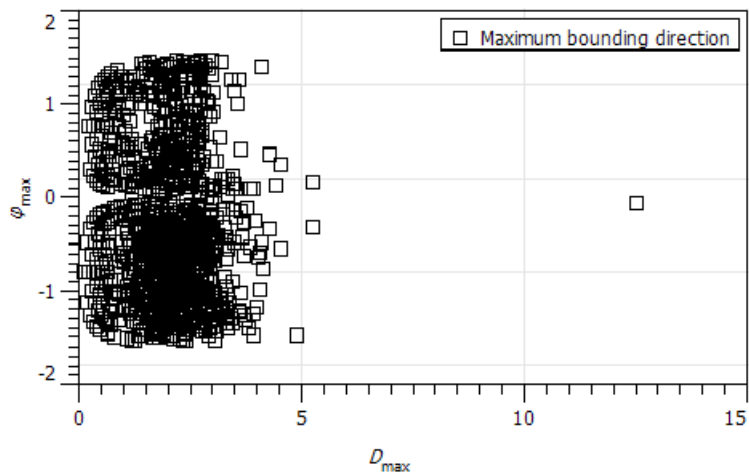


Slika 4.10: Prikaz morfološke strukture sloja otočića srebra (uzorak nc261d) koji su povećani 150000 puta. Dimenzije označenog otočića su  $0.021 \times 0.018 \mu m$

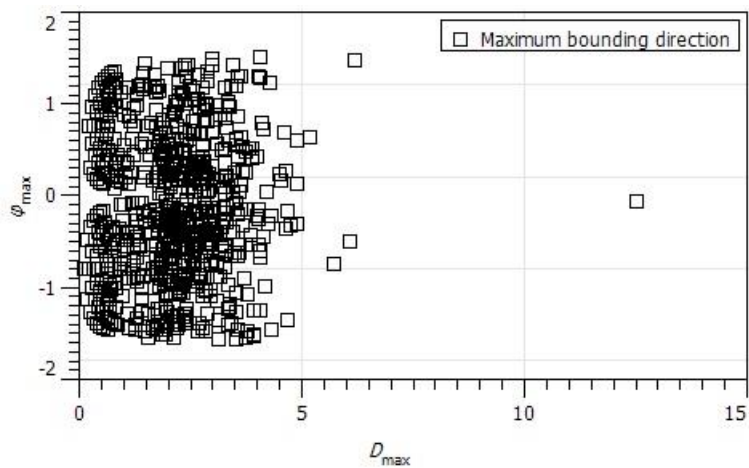


Slika 4.11: Prikaz morfološke strukture sloja otočića srebra (uzorak nc252d) koji su povećani 150000 puta. Dimenzije označenog otočića su  $0.020 \times 0.020 \mu\text{m}$ .

Slike 4.12 i 4.13 prikazuju statističku analizu usmjerenosti otočića za uzoraka nc261d i nc252d.



Slika 4.12: Prikaz statističke analize usmjerenosti otočića srebra za uzorak nc261d.



Slika 4.13: Prikaz statističke analize usmjerenosti otočića srebra za uzorak nc252d.



## 5. Diskusija

U prethodnom poglavlju smo iznijeli rezultate koje smo napravili elipsometrijskim mjerenjima. Također smo prikazali morfološke slike uzoraka koje smo napravili uz pomoć pretraživajućeg elektronskog mikroskopa, te njihovu statističku analizu usmjerenosti otočića.

Iz slika 4.1 i 4.2 možemo vidjeti da su elipsometrijske funkcije uzoraka, koji su rađeni bez magneta, približno sličnog oblika. Glavna razlika je u tome što su pomaknute za određeni iznos energije. Razlog pomaka je u tome što je svaki od izmjerenih uzoraka imao drugačiji pokrovni dielektrični sloj ili ga uopće nije imao (Tablica 3.1). Zbog razlike u pokrovnom sloju, svaki uzorak je imao drugačiju interakciju sa elektromagnetskim valom. Reflektirani val svakog uzorka koji je očitao detektor elipsometra je imao drugačiju polarizaciju i pomak u fazi. Posljedica toga su drugačije distribucije elipsometrijskih funkcija za svaki uzorak.

U poglavlju 4.2 smo izračunali pogrešku koja je nastala zbog pozicioniranja uzorka nc250. Ako promotrimo sliku 4.3 možemo vidjeti da postoji manja razlika u mjerenim rezultatima za o i p orijentaciju mjerene pod kutom od  $45^\circ$ , nego što je to vidljivo na slici 4.4 za kut od  $65^\circ$ . Razmak između srednjih vrijednosti za svaki smjer orijentacije uzorka za kut od  $45^\circ$  iznosi  $0.3^\circ$ , dok za kut od  $65^\circ$  iznosi  $0.8^\circ$ . To upućuje na veću osjetljivost elipsometrijskih mjerenja za kut od  $65^\circ$ . Na slici 4.5 se vidi da je razlika u mjerenjima za dvije orijentacije uzoraka bitno veća od pogreške koja dolazi od pozicioniranja uzorka, što upućuje na pojavu anizotropnosti.

Slika 4.6 prikazuje elipsometrijska mjerenja za uzorke rađene na BK7 staklu pod utjecajem magnetskog polja. Mjerenja su rađena pod kutovima od  $45^\circ$  i  $65^\circ$ . Uzorci su mjereni u o i p orijentaciji. Iz grafičkih prikaza možemo uočiti da se elipsometrijska funkcija  $\Psi$  ne razlikuje ovisno o orijentaciji pod kojom smo mjerili uzorke. Vidimo da se linije koje prikazuju isti kut pod različitim orijentacijama preklapaju. To upućuje na izotropnost uzorka, odnosno govori nam da nije došlo do izduljenja otočića zbog utjecaja magnetskog polja.

Kod uzorka nc253d izrađenog na Si pločici (Slika 4.7), možemo uočiti da nema promjene u elipsometrijskoj funkciji  $\Psi$  ovisno o orijentaciji pod kojom smo mjerili uzorak. Takvi rezultati upućuju na izotropnost ovog uzorka.



Uzorak nc254d također izrađen na Si podlozi (Slika 4.8) ima odstupanje elipsometrijske funkcije  $\Psi$  koju smo mjerili u različitim orijentacijama. Ovaj uzorak smo usporedili sa uzorkom nc250 koji upućuje na anizotropna svojstva (Slika 4.9). Razmak između srednjih vrijednosti funkcije  $\Psi$  (mean1 i mean2) za uzorak nc250 iznosi  $0.8^\circ$ . Funkcije  $\Psi$  koje smo mjerili za uzorak nc254d za obje orijentacije razlikuju se za  $0.6^\circ$ . Obzirom da se razmaci funkcije  $\Psi$  za oba uzorka ne razlikuju za veliku vrijednost, možemo reći da razlike u mjerenjima za o i p orijentaciju uzorka nc254d ne potječu od greška o pozicioniranju, nego isto upućuju na anizotropna svojstva. Uspoređivali smo mjerenja rađena za kut od  $65^\circ$ . Također, možemo primijetiti da se krivulje za svaki uzorak bitno razlikuju, te su međusobno dosta udaljene. Razlog toga je što su uzorci rađeni na različitim podlogama, a jedan od njih ima i pokrovni dielektrični sloj. Svjetlo neće imati jednaku interakciju, te se zbog toga krivulje bitno razlikuju.

Iz SEM slika (Slike 4.10 i 4.11) možemo uočiti da su metalni otočići srebra uglavnom sferičnog oblika, no neki otočići imaju izduljeni i nepravilniji oblik. Možemo uočiti kako se morfološke slike razlikuju za pojedine uzorke. Kod uzorka nc261d vidimo kako su otočići međusobno gušće raspoređeni i približno su jednakih veličina, dok uzorak nc252d ima otočiće koji su međusobno više udaljeni. Anizotropna svojstva ne ovise samo o obliku otočića već i o njihovoj usmjerenosti. Kada bi izduljenja bila posljedica utjecaja magnetskog polja, postojalo bi preferencijalno usmjerenje otočića. Kako bi utvrdili imaju li uzorci nc261d i nc252d anizotropna svojstva, napravili smo statističku analizu usmjerenosti otočića (Slike 4.12 i 4.13). Slike predstavljaju raspodjelu većeg promjera tj dužine ( $D_{\max}$ ) izduljenih otočića po usmjerenju. Svaki kvadratić na slici predstavlja jedan otočić srebra neke dužine usmjerenim u nekom smjeru  $\varphi_{\max}$ . U slučaju izotropnih uzoraka slika bi trebala biti simetrična oko smjera 0, što vrijedi za uzorak nc252d. Ako promotrimo statističku analizu usmjerenosti otočića za uzorak nc261d, možemo uočiti da je više otočića usmjereno u negativnom smjeru vrijednosti  $\varphi_{\max}$ . Slika nije simetrična oko smjera 0, što upućuje na anizotropna svojstva uzorka nc261d. Elipsometrijskim mjerenjima nije utvrđena anizotropnost uzorka nc261d, možda iz razloga što je anizotropnost premala da bi se detektirala elipsometrom.

Iz dobivenih mjerenja nismo uočili anizotropna svojstva za sve uzorke koji su rađeni sa magnetima. Postoji više razloga koji bi mogli upućivati na takav ishod. Jedan od razloga može biti da pogreška koja nastaje zbog pozicioniranja uzorka maskira anizotropnost. Tijekom elipsometrijskih mjerenja za različite orijentacije, uzorak smo morali ručno skinuti sa vakuumskog stanka i okrenuti za  $90^\circ$ . Posljedica toga je nemogućnost pozicioniranja

uzorka da se za svaku njegovu orijentaciju mjerenje vrši točno u istoj točki. Obzirom da su razlike  $\Psi$  funkcije za o i p orijentaciju uzorka nc250 veće od izračunate pogreške, mjerenja pak upućuju na anizotropna svojstva. Zato ovaj razlog možemo eliminirati kao jedini uzrok nepojavljivanja anizotropnih svojstva kod ostalih uzoraka rađenih sa magnetima. Otočići srebra mijenjaju svoja svojstva kada su izloženi atmosferskim uvjetima. Otočići mijenjaju oblik, pri čemu postaju više zaobljeni, te se na njihovoj površini stvara crno obojeni sloj srebrovog sulfida. Ovo je drugi mogući razlog zašto nemamo pojavu anizotropnosti kod ostalih uzoraka rađenih sa magnetom. Njega također možemo eliminirati zbog rezultata mjerenja napravljenih kod uzorka nc250. Radili smo tri seta elipsometrijskih mjerenja za svaku orijentaciju uzorka nc250 nakon tri mjeseca. Uzorak je bio star, bez pokrovnog dielektričnog sloja, no ipak mjerenja upućuju na anizotropnost ovog uzorka. Najvjerojatniji razlog zašto nemamo pojavu anizotropnosti kod svih uzoraka su magneti koje smo koristili. Koristili smo neodimijske magnete koji imaju deklariranu silu od 25 N. Proizvođači magneta ne garantiraju da svi magneti imaju točno deklariranu silu, što znači da svi uzorci nisu nužno imali jednake magnete. Također, zagrijavanjem magneta gube se njegova magnetska svojstva. Neodimijski magneti počinju gubiti svoja magnetska svojstva iznad temperature od 200°C, a mi smo ih tijekom procesa naparavanja zagrijali na 225°C. Uočili smo da se magneti lakše razdvajaju nakon naparavanja uzoraka, no ne jednako, što upućuje da nisu svi magneti jednako gubili magnetska svojstva. Moguće je da slabljenjem magnetskih svojstva magneta magnetsko polje nije bilo dovoljno jako da bi utjecalo na rast otočića za sve uzorke.

## 6. Zaključak

U ovom radu smo htjeli vidjeti vodi li rast metalnih otočića u magnetskom polju na njihovo izduljenje tj. pojave anizotropnosti u sloju. Na temelju dobivenih elipsometrijskih mjerenja vrlo smo sigurni da postoji anizotropija s obzirom da smo ju našli na dva uzorka. Nismo je uspjeli dobiti na svim uzorcima najvjerojatnije zbog preslabih ili neujednačenih magneta koje smo koristili. Anizotropnost se ne gubi s vremenom, na što nam ukazuje uzorak nc250 koji je bio izložen atmosferskim uvjetima tri mjeseca prije mjerenja. Također, uzorak nc250 nije imao pokrovni dielektrični sloj što znači da nam on nije nužan kako bi se zadržala anizotropna svojstva.

U daljnjem istraživanju trebalo bi analizirati uzorak nc250 uz pomoć pretraživajućeg elektronskog mikroskopa. Iako bi analiza bila otežana zbog podloge od BK7 stakla, donijela bi dodatne informacije o anizotropiji tog uzorka. Pri procesu naparavanja trebalo bi koristiti jače i ujednačene magnete koji ne bi bili osjetljivi na primijenjeno zagrijavanje.

## 7. Metodički dio

### 7.1. Opažanja i eksperiment u nastavi fizike

Kako bi učenici bolje razumjeli i više zavoljeli nastavu fizike nužno je izvođenje eksperimenta. Profesor bi trebao na zanimljiv i interaktivan način predložiti da je fizika prirodna znanost koja se temelji na eksperimentu [24].

Sastavni dio eksperimenta je opažanje, a opažatelj je osoba čija je pažnja usmjerena na određeni aspekt eksperimenta. Nije isto da li nam određenu pojavu opisuje laik ili znanstvenik. Uzmemo primjer spektra koji se dobiva kada bijela svjetlost prolazi kroz neki plin. Fizikalno neobrazovani opažatelj će uočiti dugine boje isprekidane okomitim, crnim linijama. Fizičar će znati da se radi o apsorpcijskom spektru, te će moći odrediti sastav plina kroz koji je prošla bijela svjetlost. Što većim znanjem opažatelj raspolaže, to je veće područje u kojem on može opažati. Ova dva opažatelja nisu ekvivalentna zato jer fizičar raspolaže znanjem iz područja u kojem je eksperiment napravljen, te ga samim time bolje razumije. U nastavi fizike imamo učenike istog uzrasta, koji slušaju uglavnom isti program. Unatoč tome učenici istog razreda nisu ekvivalentni opažatelji. Međusobno se razlikuju po stečenim sposobnostima, interesima, fizikalnom predznanju i dostignutoj razini kognitivnog razvoja. Iz ove činjenice možemo zaključiti da bi najefikasnije bilo individualno provoditi opažanja i eksperimente te raspravljati o rezultatima. Obzirom da to nije moguće postići, taj nedostatak možemo nadomjestiti izvođenjem pokusa u grupama ili frontalnim pokusom koji je interaktivno vođen od strane profesora [24].

Po načinu izvođenja pokusa, u nastavi fizike, razlikujemo nekoliko tipova eksperimenta:

- Frontalni eksperiment u učionici
- Učenički eksperiment u učionici
- Kućni eksperiment
- Praktikumski eksperiment
- Projekti koji uključuju eksperimentalni rad

Frontalni eksperiment je najčešće korišten tip eksperimenta u nastavi fizike. Izvodi ga nastavnik pred cijelim razredom, u interakciji sa učenicima. Frontalni se eksperiment može koristiti za demonstracijski prikaz neke pojave ili za kvantitativno određivanje

međuvodnosti fizikalnih veličina. Nastavnik treba voditi računa da je eksperimentalni postav dobro vidljiv sa svih mjesta u razredu, kako bi svi učenici sudjelovali. Prije izvođenja pokusa učenike treba pitati što očekuju, a nakon izvedenog pokusa raspraviti iznesena opažanja. Funkcija demonstracijskog eksperimenta je da učenik opažanjem skupi informacije koje mu pomažu u objašnjenju određene pojave. Takav eksperiment se najčešće koristi na početku nastavne jedinice, za otvaranje problemskih situacija i kao temelj za uvođenje i razumijevanje novog koncepta. Kvantitativni frontalni eksperiment se izvodi u fazi razrješavanja problema kada je on već definiran na temelju prije izvedenog demonstracijskog eksperimenta i interaktivne rasprave.

Učenički eksperiment izvode sami učenici podijeljeni u grupe od dvoje do petero učenika. Najbolje je da svi učenici rade isti pokus, koji je najčešće kvantitativan. Prije samog pokusa nastavnik iznese problem koji će učenici pokušati riješiti eksperimentom. Nakon pokusa svaka grupa iznosi svoje rezultate koje s nastavnikom analiziraju i raspravljaju o njima. Prednosti ovakvog tipa eksperimenta je što su učenici u izravnom kontaktu s eksperimentalnim postavom preko kojeg dobivaju fizikalno iskustvo. Također, učenici mogu s svojim školskim kolegama raspravljati o problemu tijekom samog pokusa. Nažalost, grupne eksperimente nije moguće provesti u svim školama zbog nedovoljne opremljenosti.

Kućni eksperiment učenici rade kod kuće. Radi se o jednostavnim eksperimentima koji se mogu izvesti uz pomoć priručnog materijala. Najbolje je takav eksperiment zadati kao neobvezni domaći rad, te omogućiti onim učenicima koji su ga napravili da ga demonstriraju pred cijelim razredom.

Praktikumski tip eksperimenta se rijetko koristi u nastavi fizike. Zahtijevaju dobru opremljenost škole i veću satnicu fizike. Uključuje izvođenje mjerenja iz već naučenih programskih sadržaja. Najveća uloga eksperimenta je da učenik izvođenjem eksperimenta i opažanjem stekne fizičko iskustvo koje mu omogućuje daljnje razumijevanje gradiva, stoga je ovaj tip eksperimenta najbolje kombinirati s frontalnim i grupnim učeničkim eksperimentima.

U projektima, koji uključuju eksperiment, učenici dobiju određeni problem o kojem trebaju razmisliti. Sami trebaju osmisliti pokus i način na koji će ga izvesti. Ovaj tip eksperimenta poboljšava kreativnost učenika, potiče ih na razmišljanje i samostalno rješavanje problema.

Mnogi nastavnici ne primjenjuju eksperimente u nastavi fizike za što imaju brojna opravdanja kao što su: neopremljenost kabineta, premala satnica, pokusi zahtijevaju puno truda, dosta često ne uspiju, činjenica da se na razrednim ispitima zahtjeva uglavnom

rješavanje numeričkih zadataka itd. Veliki broj nastavnika prakticira podučavanje fizike samo na temelju rješavanja numeričkih zadataka. Ovakav pristup uništava činjenicu da je fizika i eksperimentalna znanost i nažalost mnogi učenici nemaju mogućnost da to otkriju. Nastava fizike postaje dosadna, naporna i veliki problem za većinu učenika. Uvođenje eksperimenata u nastavu fizike daje mogućnost učenicima da izraze svoja razmišljanja, stavove i sudjeluju u rješavanju problema. Time na neki način dobiju dojam o tome kakva je fizika znanost i na koji način se razvijala kroz povijest. Mogućnost da sudjeluju u nastavi dovodi do njihove veće zainteresiranosti za fiziku. Osim samog uvođenja eksperimenata u nastavu vrlo je važan i način na koji ih provodimo. Prije izvođenja pokusa nastavnik treba dati kratak opis eksperimentalnog postava, te provjeriti poznaju li učenici sve instrumente koji će se koristiti. Važno je upitati učenike da se izjasne što očekuju od eksperimenta. Ako se svi učenici ne slažu sa opažanjima koja su prikupili tijekom eksperimenta, bitno ga je ponoviti na način da im usmjerimo pažnju na onaj aspekt koji želimo da promatraju. Tek nakon što su se svi usuglasili oko opažanja, nastavnik pokreće interaktivnu raspravu.

Smatram da je eksperiment u nastavi fizike neophodan kako bi pružili najbolju naobrazbu učenicima iz tog predmeta. Nažalost, postoje mnogi nastavnici koji ne znaju za interaktivnu istraživački usmjerenu nastavu ili je ne žele primijeniti. Kako bi se riješio taj problem potrebno je educirati nastavnike fizike na koji način mogu uvesti eksperimente u nastavu i kako ih trebaju interpretirati s učenicima.

## 7.2. Oerstedov pokus

Oerstedov pokus se izvodi u srednjoj školi za uvođenje magnetskog polja ravnog vodiča kao dio nastavne cjeline elektromagnetizam. Ova nastavna cjelina predstavlja velike konceptualne poteškoće za učenike jer sadrži niz apstraktnih pojmova i pravila. Uloga nastavnika je da na što bolji način interpretira i razjasni pojave koje su vezane za taj dio gradiva.

Oerstedov pokus mogu izvoditi nastavnici kao demonstracijski eksperiment ili učenici u grupama. Za pokus nam je potrebna magnetska igla na postolju, žica za spajanje, ispravljač, dva stalka i dvije hvataljke. Pokus složimo tako da žicu postavimo na stalak u smjeru sjever-jug, a magnetsku iglu postavimo ispod žice. Učenicima napomenemo da uz pomoć ispravljača možemo mijenjati jakost struje [25].

U ovom trenutku upitamo učenike što očekuju da će se dogoditi kada pustimo struju kroz žicu. Ovaj korak je jako bitan jer potiče učenike na kreativnost i razmišljanje. Tek kada su se učenici izjasnili i dali svoje ideje, nastavnik izvodi pokus.

Kada uključimo struju magnetska igla koja se nalazi ispod vodiča se zakreće. Prvotno je bila usmjerena u smjeru sjever-jug zbog magnetskog djelovanja Zemlje na iglu. Pojačamo li jakost struje povećat će se i odklon igle. Prekinemo li dovod struje, igla će se vratiti u svoj prvotni položaj. Nastavnik mora voditi računa da je žica usmjerena u smjeru sjever-jug kako ne bi magnetsko polje struje koja prolazi kroz žicu bilo istog smjera kao i magnetsko polje Zemlje, pri čemu se magnetska igla neće otkloniti [26].

Nakon pokusa tražimo od učenika da iznesu svoja opažanja, te ih interaktivnim razgovorom navodimo na zaključak da struja koja prolazi ravnim vodičem stvara magnetsko polje koje zakreće magnetsku iglu. Nadalje nizom pitanja i pokusa istražujemo svojstva tog magnetskog polja oko ravnog vodiča kojim prolazi struja. Uočavamo da se odklon magnetske igle, tj. magnetsko polje smanjuje kako se udaljavamo od vodiča, a povećava se ako povećavamo struju koja prolazi kroz vodič. Također se uočava kako se smjer magnetskog polja mijenja u različitim položajima oko vodiča. Ovim pokusom uvodimo i pravilo desne ruke uz pomoć kojeg određujemo smjer magnetskog polja. Ako nam je palac usmjeren u smjeru struje, onda savijeni prsti pokazuju smjer magnetskog polja. Magnetske linije ravnog vodiča su koncentrične kružnice koje leže u ravnini koja je okomita na vodič [26].

Oerstedov pokus je primjer povijesno važnog pokusa koji se i danas može i treba izvoditi u nastavi fizike da bi se učenicima približili apstraktni pojmovi kao što je magnetsko polje.

# Literatura

- [1] M. Lončarić, J. Sancho-Parramon, M. Pavlović, H. Zorc, P. Dubček, A. Turković, S. Bernstorff, G. Jakopic, A. Hasse, *Optical and structural characterization of silver island films on glass substrates*, Vacuum 84, str. 188-192 (2010).
- [2] N. Kaiser, *Review of the fundamentals of thin-film growth*, Applied optics. Vol. 41, No. 16, str. 3053-3060. (2002).
- [3] W. Chen, M. D. Thoreson, S. Ishii, A. V. Kildishev, V.M. Shalaev, *Ultra-thin ultra-smooth and low-loss silver films on germanium wetting layer*, Optics express. Vol. 18, No.5, str. 5124-5134 (2010).
- [4] S. G. Moiseev, *Thin-film polarizer made of heterogeneous medium with uniformly oriented silver nanoparticles*, Meta 10, str. 545-548 (2010).
- [5] S. M. Vuković, Z. Jakšić, I. V. Shadrivov, Y. S. Kivshar, *Plasmonic Crystal Waveguides*, Meta 10, str. 89-92 (2010).
- [6] W. Cao, H. E. Elsayed-Ali, *Stability of Ag nanoparticles fabricated by electron beam lithography*, Materials Letters 63, str. 2263-2266 (2009).
- [7] M. Lončarić, *Optička i strukturna svojstva ultratankih slojeva plemenitih metala*, (Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, 2011).
- [8] M. Gašparić, *Određivanje praga perkolacije i starenje filmova s metalnim otočićima* (Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, 2013).
- [9] <https://www.el-cat.com/silicon-properties.htm>, 5.9.2016
- [10] D. B. Sánchez, *The Surface Plasmon of Supported Noble Metal Nanoparticles: Characterization, Laser Tailoring, and SERS Application* (Inaugural-Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften, Universität Kassel, 2007).
- [11] [http://www.colorado.edu/physics/phys4510/phys4510\\_fa05/Chapter1.pdf](http://www.colorado.edu/physics/phys4510/phys4510_fa05/Chapter1.pdf), 10.7.2016



- [12] V. Henč-Bartolić, P. Kulišić, *Valovi i optika*, Školska knjiga, Zagreb, 2004.
- [13] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/polclas.html>, 10.7.2016
- [14] <http://www.fisica.unam.mx/liquids/images/tutorials/principle.pdf>, 5.9.2016
- [15] O. Stenzel, *Optical Coatings*, Springer Series in Surface Sciences 54, str. 279-315 (2014).
- [16] D. J. Griffiths, *Introduction to Electrodynamics*, New Jersey, Prentice Hall, 1999.
- [17] <https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetism#Diamagnetism>, 10.9.2016
- [18] S. Hartland, *Surface and interfacial tension*, Zurich, ETH Swiss Federal Institute of Tehnology, 2004.
- [19] Y. Yuan, T. R. Lee, *Contact Angle and Wetting Properties*, Springer Series in Surface Science Techniques 51, str. 3-34 (2013).
- [20] E. Garcia-Caurel, A. De Martino, J-P. Gaston, L. Yan, *Application of Spectroscopic Ellipsometry and Mueller Ellipsometry to Optical Characterization*, Applied Spectroscopy, Vol. 67, str. 1-21 (2013).
- [21] G. Mršić, S. Žugaj, *Analiza GSR čestica uporabom elektronskog mikroskopa (SEM/EDX)*, Polic. sigur. (Zagreb), godina 16., broj 3-4, str. 179-200 (2007).
- [22] D. Pavić, *Rasterski elektronski mikroskop* (Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, 2001).
- [23] Faculty of engineering, *Electron Beam Evaporation*, Processing and fabrication technology, Trimester 2 (2011/2012).
- [24] R. Krsnik, *Suvremene ideje u metodici nastave fizike*, Školska knjiga, Zagreb, 2008.
- [25] D. Mayer, *Fizika za treći razred gimnazije*, Školska knjiga, Zagreb, 1969.
- [26] L. Franić, *Elektromagnetna indukcija u nastavi fizike* (Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, 2007).

